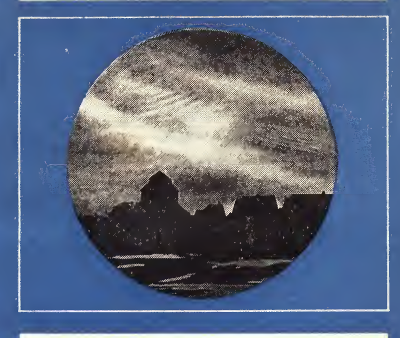
БИБЛИОТЕКА ЛЮБИТЕЛЯ АСТРОНОМИИ



В. А. БРОНШТЭН

СЕРЕБРИСТЫЕ ОБЛАКА И ИХ НАБЛЮДЕНИЕ

БИБЛИОТЕКА ЛЮБИТЕЛЯ АСТРОНОМИИ

*

В. А. БРОНШТЭН

СЕРЕБРИСТЫЕ ОБЛАКА И ИХ НАБЛЮДЕНИЕ



МОСКВА «НАУКА»
ГЛАВНАЯ РЕДАКЦИЯ
ФИЗИКО-МАТЕМАТИЧЕСКОЙ ЛИТЕРАТУРЫ
1984

523.2
Б 88
УДК 525.7

РЕДАКЦИОННАЯ КОЛЛЕГИЯ
Председатель Г. С. ХРОМОВ

Бронштэн В. А.

Б 88 Серебристые облака и их наблюдение.— М.: Наука. Главная редакция физико-математической литературы, 1984.— 128 с., илл. Библиотека любителя астрономии.

В книге рассказывается о самых высоких облаках земной атмосферы — серебристых, или мезосферных облаках. В первой главе рассказано об условиях видимости, структуре, оптических свойствах, природе и происхождении серебристых облаков, об исследованиях их из космоса. Во второй главе даны указания к наблюдениям серебристых облаков средствами любителя астрономии.

Б $\frac{1705050000-021}{053\,(02)\text{-}84}$ 183-84

ББК 523.2
526

Виталий Александрович Бронштэн

СЕРЕБРИСТЫЕ ОБЛАКА И ИХ НАБЛЮДЕНИЕ

(Серия: «Библиотека любителя астрономии»)

Редактор *Г. С. Куликов*
Техн. редактор *Е. В. Морозова*
Корректоры *Т. С. Вайсберг, Л. С. Сомова*

ИБ № 12442

Сдано в набор 26.07.83. Подписано к печати 27.12.83. Т-22288. Бумага 84×108¹/₃₂. Бумага для глубокой печати. Литературная гарнитура. Высокая печать. Условн. печ. л. 6,72. Усл. кр.-отт. 7,12. Уч.-изд. л. 7,06. Тираж 63 000 экз. Заказ № 2153/15. Цена 20 коп.

Издательство «Наука»
Главная редакция физико-математической литературы
117071, Москва, В-71, Ленинский проспект, 15

Набрано в ордена Октябрьской Революции и ордена Трудового Красного Знамени Первой Образцовой типографии имени А. А. Жданова Союзполиграфпрома при Государственном комитете СССР по делам издательств, полиграфии и книжной торговли. Москва, М-54, Валовая, 28

Отпечатано в Подольском филиале ПО «Периодика» Союзполиграфпрома при Государственном комитете СССР по делам издательств, полиграфии и книжной торговли. г. Подольск, ул. Кирова, д. 25

Б $\frac{1705050000-021}{053\,(02)\text{-}84}$ 183-84

© Издательство «Наука». Главная редакция физико-математической литературы, 1984

ПРЕДИСЛОВИЕ

Наблюдение серебристых облаков — одна из наиболее благодарных задач для любителя астрономии. Серьезные научные результаты могут быть получены с помощью обычных любительских фотоаппаратов с несложными дополнительными приспособлениями, изготовление которых посильно каждому. Некоторые виды наблюдений (например, синоптические) вообще не требуют никаких приборов, кроме часов.

Но можно ли считать серебристые облака астрономическим объектом? Ведь они находятся в нашей земной атмосфере, хотя и очень высоко — на высотах 75—90 км.

Однако серебристые облака — не только один из видов облаков земной атмосферы и даже не только своеобразный индикатор движений в ее верхних слоях. На страницах этой книги читатель встретится с такими астрономическими факторами, как солнечный ветер, метеорное вещество, познакомится с облаками в атмосферах Венеры и Марса — аналогами серебристых облаков. Многие описываемые в книге методы наблюдений (фотометрия, поляриметрия) могут применяться для исследования других небесных тел. Попробовав свои силы в наблюдениях, описанных в книге, читатель познакомится с методами, широко применяемыми в астрономии, научится правильно проводить и фиксировать научные наблюдения, тщательно осуществлять лабораторную обработку фотоснимков.

Один из основных законов для астронома-любителя: *ни одного наблюдения не оставлять без обработки*. Автор постарался подробно описывать не только методы наблюдений, но и приемы обработки. Любитель астрономии должен овладеть искусством умело вычислять, помня, что в астрономии нельзя шагу ступить без математики.

Зато какие возможности откроются перед теми, кто не пожалеет времени и труда для обработки наблюдений. Не

выходя за пределы элементарной математики, любитель (или группа, кружок любителей астрономии) сможет определить из своих наблюдений расположение серебристых облаков над Землей, скорость и направление их движения, их высоты, яркость и видимое альбедо, поляризацию, показатель цвета. Результаты таких наблюдений будут вполне достойны опубликования в «настоящем» научном журнале.

Книга состоит из двух глав. В первой главе даны основные сведения о серебристых облаках: история их открытия и исследования, условия наблюдения, скорости и высоты, морфология и структура, оптические свойства. Далее рассказывается о результатах наблюдений серебристых облаков с космических кораблей и орбитальных станций. Последние параграфы этой главы посвящены природе серебристых облаков и их аналогам — высоким конденсационным облакам в атмосферах других планет.

Поскольку понимание процессов, приводящих к образованию серебристых облаков, невозможно без ясных представлений о строении земной атмосферы, этому вопросу посвящен специальный параграф.

Вторая глава предназначена для наблюдателей серебристых облаков. После постановки задач наблюдений описываются различные виды и методы наблюдений серебристых облаков: синоптические наблюдения, фотографирование, замедленная киносъемка, определение положений серебристых облаков в проекции на земную поверхность, их скоростей, высот, фотометрия, колориметрия и поляриметрия. Всюду описаны не только методы наблюдений (а где это нужно — и конструкции необходимых приспособлений), но и методы обработки наблюдений, приведены формулы для вычислений.

В приложениях приведен ряд таблиц, облегчающих обработку наблюдений, и календарь сроков начала и конца наблюдений серебристых облаков.

Автор надеется, что эта книга станет полезным пособием для любителей астрономии и в первую очередь для наблюдателей серебристых облаков.

В. А. Бронштэн

ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ О СЕРЕБРИСТЫХ ОБЛАКАХ

§ 1. ОТКРЫТИЕ И ПЕРВЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ

Ранним утром 12 июня 1885 г. приват-доцент Московского университета В. К. Цераский (будущий директор Московской обсерватории), возвращаясь с прогулки, заметил на предрассветном небе необычно яркие облака, заполнявшие сумеречный сегмент. Эти облака произвели на Цераского большое впечатление. Особенно удивило ученого то обстоятельство, что эти «светящиеся» облака, ярко выделяясь на фоне сумеречного сегмента, совершенно пропадали, выходя за его пределы.

В то время Цераский занимался фотометрией блеска звезд, значительно усовершенствовал для этого визуальный фотометр Цёлльнера (получивший впоследствии название фотометра Цёлльнера — Цераского), и его крайне беспокоило такое «поведение» светящихся облаков. Ведь они, не будучи видимы, но поглощая свет звезд, могут искажать результаты фотометрических измерений. «Вот уже два лета невозможно проводить астрофотометрические наблюдения»,— писал Цераский год спустя.

Впрочем, первые же измерения поглощательной способности ночных светящихся облаков (так назвал их Цераский), как и последующие наблюдения, показали, что эти облака весьма прозрачны и не ослабляют заметным образом свет звезд, так что Цераский волновался напрасно. (Соответствующие числовые оценки будут приведены в § 5.)

В. К. Цераский не был первым наблюдателем, заметившим серебристые облака. За 4 дня до него, 8 июня, их наблюдал Т. Бакгауз в Киссингене (Германия), а 10 июня их заметил в Праге Вацлав Ласка — будущий основатель астрономической обсерватории во Львове. Но Ласка сообщил о своих наблюдениях много позже, через несколько лет, а Бакгауз ограничился публикацией небольшой заметки в одном метеорологическом журнале. Цераский же не

удовлетворился общими наблюдениями, а спустя две недели совместно с А. А. Белопольским определил высоту серебристых облаков по наблюдениям из двух пунктов, получив в среднем из четырех наблюдений 79 км, что очень близко к современным данным.

Вот как описывал ночные светящиеся облака В. К. Цераский: «...Это настолько блестящее явление, что совершенно невозможно составить себе о нем представление без рисунков и подробного описания. Некоторые длинные, ослепительно серебристые полосы, перекрещивающиеся или параллельные горизонту, изменяются довольно медленно и столь резки, что их можно удерживать в поле зрения телескопа. Облака можно без труда сфотографировать, причем получается эффектное изображение».

Из этих слов ясно, что В. К. Цераский не только наблюдал визуально серебристые облака, но и фотографировал их. К сожалению, эти фотографии до нас не дошли. Поскольку приведенная выше запись сделана в июле 1886 г., ясно, что Цераскому удалось сфотографировать серебристые облака в 1885 или в 1886 г., за 1—2 года до О. Иессе, которому принадлежат первые опубликованные снимки серебристых облаков.

Очень яркие серебристые облака, появившиеся над Европой 23 июня 1885 г., были замечены многими наблюдателями, в том числе эстонским астрономом Э. Гартвигом в Тарту и немецким метеорологом О. Иессе в Штеглице. Отто Иессе постарался привлечь к новому явлению внимание как можно большего количества наблюдателей: метеорологов и астрономов, путем публикации наблюдений и «призывов к наблюдениям». Именно Иессе ввел в науку термин «серебристые облака». В 1889 г. он получил удачные снимки серебристых облаков с двух станций (рис. 1), по которым измерил их высоту —75 км, что было близко к значению, полученному нашими учеными. Их измерения, увы, были опубликованы Цераским только в 1887 г. в его работе «Астрономический фотометр и его приложения». На Западе они стали известны, однако, не из этой работы, а из краткого сообщения в журнале «Ciel et Terre» бельгийского астронома Ж. Нистена, побывавшего в августе 1887 г. в России (с целью наблюдения полного солнечного затмения) и узнавшего об измерениях русских астрономов от А. А. Белопольского.

В последующие годы О. Иессе провел большую серию измерений высот и скоростей движения серебристых облаков, получив их среднюю высоту 82 км с весьма неболь-

шим разбросом (± 5 км) и скорости движения $40 \div 180$ метров в секунду с преимущественным направлением на юго-запад.

В. К. Цераский наблюдал серебристые облака до 1892 г., а в 1890 г. опубликовал заметку «О светящихся облаках», где подводил итоги своим наблюдениям.



Рис. 1. Первые фотографии серебристых облаков 2? июля 1889 г. (О. Иессе, Германия).

20 декабря 1888 г. было получено первое сообщение о наблюдении серебристых облаков в южном полушарии — их наблюдал Штубенраух в Пунта-Аренас (Чили, широта —52°). Но в Северной Америке серебристые облака не наблюдались до 1933 г. (!). Возможно, что на них там просто не обращали внимания.

Начиная с 1892 г. интенсивность серебристых облаков пошла на убыль и количество их наблюдений резко уменьшилось.

Первая гипотеза, объяснявшая образование серебристых облаков конденсацией паров, занесенных в верхнюю атмосферу в результате взрыва вулкана Кракатау 27 августа 1883 г., была высказана в 1887 г. немецким физиком Ф. Кольраушем и поддержана О. Иессе. Эта гипотеза «прожила» около 40 лет и была оставлена после того, как другие мощные извержения вулканов (Мон-Пеле, 1902 г.; Катмаи, 1912 г.) не вызвали появления серебристых облаков.

Новый прилив интереса к серебристым облакам связан с их появлением в период аномальных оптических явлений после падения Тунгусского метеорита 30 июня 1908 г. Впрочем, о самом Тунгусском явлении ученые узнали гораздо позже, уже в начале 20-х годов. Именно тогда начали формироваться новые идеи и гипотезы о природе и происхождении серебристых облаков.

В 1926 г. Л. А. Кулик, стремясь объяснить появление интенсивных серебристых облаков сразу же после падения Тунгусского метеорита, высказал мнение, что «серебристые облака обязаны своим происхождением метеоритам — наиболее мелкой легкой части продуктов возгонки их вещества при их вторжении в земную атмосферу». Тогда же Л. А. Кулик уточнил, что не только продукты распыления в атмосфере метеоритов, но и продукты испарения метеоров, постоянно влетающих в земную атмосферу, могут формировать частицы серебристых облаков. Так возникла метеорно-метеоритная гипотеза, просуществовавшая более 30 лет и весьма неохотно сдавшая свои позиции в конце 50-х годов конденсационной (ледяной) гипотезе.

Конденсационная гипотеза предполагает, что серебристые облака состоят из кристалликов льда, образующихся в верхних слоях атмосферы в результате конденсации водяного пара. Если не считать ее «вулканического варианта», предложенного еще в 1887—1888 гг. Ф. Кольраушем и О. Иессе, то можно считать временем возникновения конденсационной гипотезы 1925—1926 гг., когда она была предложена А. Вегенером и В. Ярдецким. При этом и А. Вегенер, и поддержавший эту гипотезу в 1933 г. У. Хамфрис справедливо указывали, что для образования ледяных кристалликов на высоте около 80 км должны царить очень низкие температуры (согласно Хамфрису, порядка 160 К). Но в те годы в науке господствовало представление о довольно высоких температурах на этой высоте — до 300 К. Эта точка зрения держалась до начала 50-х годов, т. е. до прямых измерений температур верхней атмосферы приборами, установленными на ракетах. Именно поэтому метеорная гипотеза в течение почти 30 лет пользовалась большей популярностью, чем конденсационная: ее поддерживали И. С. Астапович, К. Штермер (Норвегия), Е. Вестин (США).

Впрочем, еще в 1926 г. Л. А. Кулик предложил как бы компромиссный вариант, объединяющий обе гипотезы. Он писал: «...заряженные частицы одновременно оседающей метеорной пыли могли быть центрами конденсации паров воды и образующихся градин». К сожалению, эта плодот-

ворная идея прошла незамеченной и была вновь высказана, в несколько иной форме, В. А. Бронштэном четверть века спустя.

В 20-е годы наблюдения серебристых облаков вели в СССР отдельные наблюдатели-энтузиасты: С. Р. Лаптев-Зенковский, Е. Л. Кринов, О. В. Деминев, И. С. Астапович. В Норвегии К. Штермер в начале 30-х годов привел большую серию измерений высот и скоростей серебристых облаков. Он получил то же среднее значение высоты, что и О. Иессе за полвека до него —82 км.

В 1934 г. американский исследователь Е. Вестин опубликовал большой итоговый обзор, в котором были собраны результаты исследований серебристых облаков в Западной Европе за 48 лет. В этой работе была сделана первая серьезная попытка сопоставить появления серебристых облаков с извержениями вулканов, активностью метеорных потоков и другими явлениями.

В 1936 г. по инициативе И. С. Астаповича начались систематические наблюдения серебристых облаков в СССР, организованные Всесоюзным астрономо-геодезическим обществом (ВАГО). Их результаты были опубликованы в 1938—1939 гг. Г. О. Затейщиковым, В. А. Бронштэном и самим И. С. Астаповичем. С ними мы познакомим читателя ниже. Дальнейшие исследования были прерваны войной.

В послевоенные годы интерес к серебристым облакам продолжал усиливаться. В 1952 г. И. А. Хвостиков, опираясь на новые ракетные измерения температур верхних слоев атмосферы, показавших наличие на высотах 75—80 км второго температурного минимума, предложил новый вариант конденсационной гипотезы, в котором ей давалось количественное обоснование. Начиная с 1954 г., эту точку зрения развил в ряде работ В. А. Бронштэн, сумевший объяснить широтный и сезонный эффекты видимости серебристых облаков, т. е. их появление только летом и только в средних широтах.

Проведение в 1957—1959 гг. широкой программы исследований верхней атмосферы в рамках Международного геофизического года (МГГ) и Международного геофизического сотрудничества (МГС) позволило поставить разносторонние исследования серебристых облаков. Еще до начала МГГ Н. И. Гришин разработал морфологическую классификацию форм серебристых облаков, впервые получил их спектры, обнаружил связь их появлений с метеорологическими условиями в тропосфере. В дальнейшем он развил

теорию волновых процессов в серебристых облаках, применил для изучения их динамики метод замедленной киносъемки.

В период МГГ были проведены инструментальные исследования оптических свойств серебристых облаков. Успешные фотометрические и поляриметрические наблюдения их провела экспедиция Ленинградского отделения ВАГО под руководством О. Б. Васильева. Определения поляризации света и индикатрисы рассеяния частиц облаков дали возможность оценить размеры этих частиц — доли микрометра. Начались систематические исследования серебристых облаков в Эстонском и Латвийском отделениях ВАГО с передачей их в дальнейшем специальным научным учреждениям — Институту астрофизики и физики атмосферы АН ЭССР и Латвийскому университету. Эстонские астрофизики во главе с Ч. И. Виллманном также получили индикатрису рассеяния и изучили оптические свойства облаков. В Латвии М. А. Дирикис, Э. Э. Мукинс, Ю. Л. Францман разработали простые методы определения высот облаков по фотографиям, снятым из двух пунктов. Более точные, хотя и более трудные методы предложил М. И. Буров из Московского института инженеров геодезии, аэрофотосъемки и картографии. Этими методами было сделано несколько сотен измерений высот серебристых облаков, показавших, что иногда они располагаются в несколько «этажей» с интервалами в 3—5 км.

По всему Союзу начались регулярные синоптические наблюдения серебристых облаков. Их наблюдали в Эстонии, Латвии, Ленинграде, Бологом, Калинине, Ярославле, Москве, Рязани, Смоленске, Минске, Горьком, Куйбышеве, Свердловске, Новосибирске, Томске, Иркутске и других городах.

Систематические наблюдения серебристых облаков начались во многих странах мира. В США и Канаде была создана под руководством Б. Фогля специальная сеть станций. В Швеции исследования серебристых облаков (включая ракетные эксперименты) проводились под руководством Г. Витта, в ФРГ — под руководством В. Шредера и В. Фольца, в ГДР исследования серебристых облаков проводил Г. Дитце. Все эти исследования позволили узнать много нового о природе и свойствах серебристых облаков, а заодно — о динамике слоя мезопаузы, в котором они находятся. Об этих результатах будет рассказано в следующих параграфах.

§ 2. СТРОЕНИЕ ВЕРХНИХ СЛОЕВ АТМОСФЕРЫ

Для понимания того, что мы будем рассказывать дальше о серебристых облаках, необходимо иметь хотя бы общие представления о строении земной атмосферы, а особенно ее верхних слоев.

Основным признаком, определяющим подразделение атмосферы на отдельные слои, является изменение ее температуры с высотой. Характер этого изменения во многом зависит от состава атмосферы.

Нижний слой атмосферы Земли *(тропосфера)* имеет следующий химический состав (по объему, в процентах): азот — 78,09, кислород — 20,95, аргон — 0,93, углекислый газ — 0,03. На долю остальных газов приходятся уже тысячные и десятитысячные доли процента. Такой состав атмосфера имеет почти до высоты 90 км.

Но установить это удалось не сразу. Длительное время в науке господствовала теория диффузионного разделения газов, согласно которой самые легкие газы (водород и гелий) сосредоточены в верхних слоях атмосферы, а более тяжелые (азот, кислород и особенно аргон и углекислый газ) — в нижних слоях. Уже в 30-е годы XX в. удалось доказать, что благодаря интенсивному перемешиванию состав атмосферы до довольно больших высот остается постоянным и только потом начинается диффузионное разделение.

Кроме постоянных компонентов, перечисленных выше, атмосфера содержит переменные компоненты: озон и водяной пар. Эти компоненты оказывают большое влияние на тепловой режим Земли и ее атмосферы.

Рассмотрим схему строения земной атмосферы (рис. 2). Известно, что в ее нижнем слое, именуемом тропосферой (от греческого тропэ — поворот), температура быстро падает с высотой: на 6÷7 градусов на километр высоты (зимой несколько меньше). Это происходит потому, что нижние (приземные) слои атмосферы получают тепло от земной поверхности, излучающей его в диапазоне инфракрасных лучей и передающей тепло также за счет конвекции и теплопроводности. В тропосфере образуются облака, осадки, дуют ветры, образуются самые различные метеорологические явления.

В зависимости от строения атомов и молекул различных газов они способны поглощать в той или иной степени излучение в различных диапазонах длин волн. Так, молекула водяного пара (H_2O) интенсивно поглощает инфракрас-

ные лучи во всем диапазоне, за исключением «окна» на длинах волн 8÷13 мкм. Напротив, озон (трехатомный кислород, O_3) поглощает ультрафиолетовые лучи короче 0,36 мкм.

На уровне от 11 до 17 км падение температуры с высотой прекращается и начинается *стратосфера* — сравнительно

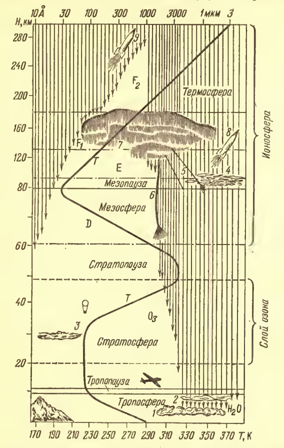


Рис. 2. Схема строения земной атмосферы: *1* — тропосферные облака нижнего яруса, *2* — перистые облака, *3* — перламутровые облака, *4* — серебристые облака, *5* — метеоры, *6* — болид, *7* — полярные сияния, *8* — метеорологическая ракета, *9* — геофизическая ракета.

спокойная область атмосферы с почти постоянной температурой до высоты 34÷36 км и ростом температуры до уровня ~50 км. Этот рост происходит за счет поглощения солнечных ультрафиолетовых лучей слоем озона, о котором

подробнее будет сказано ниже. Пограничная область между тропосферой и стратосферой называется *тропопаузой*.

Выше стратосферы, примерно от уровня озонного пика температуры и до 80—85 км простирается *мезосфера* — область нового падения температуры с высотой. Мезосферу от стратосферы отделяет узкая область *стратопаузы*, примерно соответствующей высоте озонного максимума.

Еще выше температура вновь начинает расти. Сюда еще доходит ультрафиолетовое излучение Солнца на длинах волн короче 0,2 мкм, а в этой области спектра находятся полосы поглощения Шумана—Рунге молекулы кислорода (длины волн 1925—1760 Å; 1 Å (ангстрём) = 10^{-4} мкм). Еще дальше в сторону коротких длин волн расположена сплошная область поглощения, называемая континуумом Шумана—Рунге (длины волн 1760—1350 Å). Поглощение лучей этих длин волн молекулярным кислородом приводит к нагреванию нижней *термосферы* — так принято называть область роста температуры выше 85 км.

Но поглощение солнечных ультрафиолетовых лучей приводит и к другому процессу — к диссоциации молекул кислорода на атомы. Этот процесс начинается от высоты 80 км и заканчивается на высотах 120—130 км. Выше весь кислород оказывается диссоциированным, т. е. состоящим из атомов.

С главным компонентом земной атмосферы — азотом — положение сложнее. Вероятность (или, как принято говорить, эффективное сечение) диссоциации за счет прямого поглощения солнечных лучей у молекулы азота крайне мала. Диссоциация азота возможна лишь в результате более сложных реакций, например, диссоциативной рекомбинации молекулярных ионов азота. Иначе говоря, сперва происходит ионизация молекулы азота, а потом молекулярный ион рекомбинирует с электроном, распадаясь при этом на два атома азота. Есть еще ряд реакций с участием иона молекулы окиси азота NO^+, в результате которых образуется атомарный азот. Но для осуществления первой из этих реакций — фотоионизации молекулы азота — необходимо излучение с длиной волны менее 1270 Å. Поэтому диссоциация азота начинается выше, чем диссоциация кислорода, а именно, начиная с 200 км, причем концентрация атомов азота начинает превышать концентрацию молекул только на высоте 400 км.

Что же обусловливает продолжающийся рост температуры с высотой в верхней термосфере (выше 150 км)? В основном — опять-таки ультрафиолетовое излучение Солн-

ца. В верхних слоях атмосферы происходит ионизация атомов и молекул, образуются слои заряженных частиц, известные под общим названием *ионосфера.* Но солнечные лучи, ионизуя атомы и молекулы воздуха, сообщают им дополнительную энергию, переходящую в скорости беспорядочных движений, что и проявляется в увеличении температуры до 2000 градусов на высоте около 1000 км. Заряженные частицы путем столкновений передают энергию нейтральным частицам.

Выше 100 км начинается диффузионное разделение газов, поскольку перемешивание на этих высотах уже не играет той роли, как на более низких уровнях. Химический состав атмосферы начинает меняться с высотой. Эта область переменного состава атмосферы называется *гетеросферой*, тогда как область постоянного состава (ниже 100 км) называется *гомосферой.*

Если до высоты 180 км главным компонентом атмосферы продолжают оставаться молекулы азота, то в интервале высот 180—600 км их место занимают атомы кислорода. Между 600 и 1500 км главным компонентом является гелий, еще выше — атомарный водород. Нужно, однако, помнить, что границы эти условны и зависят от времени суток, а также от уровня солнечной активности.

Рассмотрим теперь строение атмосферы с несколько иной точки зрения, а именно с точки зрения ее взаимодействия с солнечными лучами. Хотя об этом уже не раз говорилось, мы совершим здесь как бы путешествие вместе с солнечным лучом в направлении сверху вниз. Это позволит привести все сказанное о взаимодействии излучения Солнца с атомами и молекулами атмосферы в стройную систему.

Солнечные лучи вступают на границу земной атмосферы как бы широким фронтом — на всех длинах волн. Сначала происходит ионизация атомов водорода (преобладающих, как мы видели, выше 1500 км), затем атомов гелия и кислорода. Но из-за разреженности атмосферы на больших высотах поглощение солнечного излучения выше 300 км практически незаметно.

Однако ниже 300 км поглощение ультрафиолетовых лучей постепенно растет в результате ионизации сначала атомов кислорода, затем атомов и молекул азота и молекул окиси азота и, наконец, молекул кислорода. Поглощаются в основном лучи с длинами волн от 100 до 1020 Å (энергия фотона с длиной волны 1020 Å соответствует потенциалу ионизации атома кислорода — это наименьшая энергия,

необходимая для отрыва от атома внешнего электрона). Уже на высотах 120—140 км эта ча́сть солнечного спектра поглощается полностью. Зато она обеспечивает ионизацию самого мощного слоя ионосферы — слоя F, который принято подразделять на два подслоя: F_1 (130—180 км) и F_2 (180—1000 км). Максимум электронной концентрации (равной на этих высотах концентрации положительных ионов) достигается на высотах 250—300 км. Она равна там примерно 10^6 электронов/см³.

Ниже 130 км проходят мягкие рентгеновские лучи (30—100 Å), которые ионизуют слой E ионосферы (90—130 км). Жесткое рентгеновское излучение доходит до высот 60 км и образует самый нижний, хотя и обладающий наименьшей электронной концентрацией (10^3 электронов/см³) слой D ионосферы.

Надо заметить, что мы нарисовали здесь лишь самую общую схему процессов. Ведь, кроме ионизации, непрерывно «работает» обратный процесс — рекомбинация, приводящий к уничтожению ионов и электронов, к воссоединению их в нейтральные частицы. Изучением процессов, происходящих в верхних слоях атмосферы с атомами, молекулами, ионами и электронами при их взаимодействии друг с другом и с солнечным излучением, занимается наука *аэрономия* *).

Вернемся к солнечному излучению. Потеряв на высоте 100 км полностью свой самый коротковолновый участок ($\lambda < 1020$ Å), оно начинает далее испытывать поглощение лучей на бо́льших длинах волн. Молекулы кислорода поглощают излучение в континууме Шумана—Рунге (1760—1220 Å), энергия которого расходуется на их диссоциацию. Ниже 80 км эта часть солнечного спектра поглощается полностью. Однако излучение в области полос Шумана—Рунге (1925—1760 Å) проходит и продолжает диссоциировать молекулы кислорода ниже 80 км. Образовавшиеся атомы кислорода могут взаимодействовать со своими молекулами и с какой-нибудь третьей частицей (обозначим ее буквой M), образуя в таких тройных столкновениях молекулы озона O_3:

$$O_2 + O + M \rightarrow O_3 + M.$$

Так образуется слой озона, или *озоносфера*. Он не может образоваться выше 80 км, поскольку вероятность тройных

*) Весьма популярное изложение основ этой науки читатель найдет в книге: *Данилов А. Д.* Популярная аэрономия.— Л.: Гидрометеоиздат, 1978, 136 с.

столкновений быстро падает с уменьшением плотности атмосферы на больших высотах. Не может озон образовываться и ниже 10 км — там нет атомов кислорода, поскольку излучение в области полос Шумана — Рунге полностью поглощается выше этого уровня.

Но озон сам является мощным поглотителем ультрафиолетовых лучей вплоть до длины волны 3100 Å. Энергия этих лучей расходуется на диссоциацию молекул озона, уравновешивая их образование в ходе тройных столкновений. Максимальная концентрация озона достигается на высотах 25—30 км. Этот уровень не совпадает с уровнем озонного максимума температуры 50—55 км. Происходит это потому, что лучи, несущие наибольшую энергию, поглощаются выше и до уровня максимальной концентрации озона не доходят. Те же лучи, которые достигают этого уровня, имеют относительно небольшую энергию и не могут нагреть молекулы озона, а через них — и других газов до достаточно высоких температур. Поэтому, как ни странно, в области максимальной концентрации озона температуры довольно низкие.

Хорошо известно значение озоносферы для защиты всего живого на Земле — растений, животных и людей — от губительного действия солнечных ультрафиолетовых лучей. Любые процессы, связанные с деятельностью человека, которые способны привести хотя бы к частичному разрушению озонного слоя, могут иметь роковые последствия для жизни на Земле.

В отличие от температуры, давление p и плотность ρ воздуха убывают с высотой монотонно, в соответствии с так называемой барометрической формулой:

$$p = p_0 e^{-H/H_*}; \quad \rho = \rho_0 e^{-H/H_*}. \qquad (1)$$

Здесь p_0, ρ_0 — давление и плотность на уровне моря, H — высота, отсчитываемая от этого уровня, H_* — очень важная величина, называемая *шкалой высот*, или *высотой однородной атмосферы*. Она определяет интервал высот, на котором плотность и давление уменьшаются в e раз (e=2,718...— основание натуральных логарифмов). Как показывает теория, величина H_* определяется формулой

$$H_* = \frac{RT}{\mu g}, \qquad (2)$$

где T — температура, μ — средняя относительная молекулярная масса газа, g — ускорение силы тяжести, R — универсальная газовая постоянная. Поскольку g меняется

с высотой очень медленно, можно считать, что H_* зависит только от двух переменных величин: температуры T и средней молекулярной массы μ, а в пределах гомосферы (где μ постоянна) только от T. На уровне моря $H_*=8$ км. Нетрудно сообразить, что если бы можно было создать однородную атмосферу той же плотности, что у поверхности Земли, и с тем же общим давлением, ее высота была бы равна H_*. Для тех читателей, которые знают интегральное исчисление, дадим краткое доказательство этого.

Найдем суммарную массу столба реальной атмосферы единичного сечения, используя вторую формулу (1). Для этого проинтегрируем плотность воздуха по высоте от нуля до бесконечности:

$$\int_0^\infty \rho(H)\, dH = \rho_0 \int_0^\infty e^{-H/H_*}\, dH = \rho_0 H_*. \qquad (3)$$

Таким образом, масса нашего столба равна массе столба воображаемой однородной атмосферы высотой H_* и плотностью, равной ρ_0. Поскольку давление газа $p=\rho RT$, в изотермической атмосфере, очевидно, и давление будет равно давлению однородного столба высотой H_*.

Если атмосфера неизотермична (а именно так и обстоит дело в случае земной атмосферы), величина H_* переменна и для каждого уровня имеет свое значение. Так, на уровне тропопаузы $H_*=6{,}4$ км, на уровне стратопаузы $H_*=8{,}4$ км, на уровне мезопаузы (где и образуются серебристые облака) $H_*=5$ км. В термосфере H_* быстро растет, не только за счет роста температуры, но и за счет уменьшения μ. Уже на высоте 215 км $H_*=50$ км, а на высоте 600 км $H_*=100$ км.

В заключение остановимся на некоторых явлениях, происходящих в атмосфере. Образование обычных (тропосферных) облаков происходит, как правило, на высотах от 0,5 до 6 км (слоистые, дождевые, кучевые). На бóльших высотах плавают высоко-кучевые и высоко-слоистые облака. Однако выше 7,5 км облака почти целиком состоят из ледяных кристаллов: это перистые облака, высота которых может доходить до 15—17 км.

Еще выше, на уровне 25—30 км, наблюдаются так называемые *перламутровые облака* — явление гораздо более редкое, чем серебристые облака.

На высотах от 120 до 70 км происходит испарение и плавление входящих в атмосферу метеорных тел — наблюдаются *метеоры*, свечение которых в основном определяется излучением атомов и ионов метеорных паров. На уров-

нях 80—100 км наблюдается некоторое относительное изобилие метеорных атомов и ионов: здесь они образуются, после чего смешиваются в ходе диффузии с атомами и молекулами воздуха.

При полете метеора за ним формируется ионно-электронный след, отражающий метровые радиоволны. Весь этот комплекс явлений принято называть *метеорными явлениями*.

Еще выше расположена область *полярных сияний* (рис. 3). Обычно разные формы полярных сияний располагаются на высотах от 100 до 1000 км, хотя иногда нижние



Рис. 3. Полярное сияние 18—19 июля 1965 г., видимое одновременно с серебристыми облаками (фото Б. Фогля, Канада).

границы дуг полярных сияний спускаются до 80 км. Как показывает спектральный анализ, основной вклад в свечение полярных сияний вносит излучение атомарного кислорода (особенно в зеленой линии 5577 Å), атомарного азота, их ионов, молекул азота и кислорода и их ионов, а также водорода, гелия, натрия. Возбуждение свечения всех этих частиц происходит за счет их соударений с быстрыми заряженными частицами, летящими от Солнца *(солнечный ветер)*. Это — протоны, электроны и ионы различных элементов, а также нейтральные атомы. Но основную роль в возбуждении свечения полярных сияний играют протоны и электроны. Поскольку эти частицы — заряженные, их траектории отклоняются магнитным полем Земли в сторону геомагнитных полюсов, поэтому сияния наблюдаются преимущественно в полярных районах.

Кроме полярных сияний, наблюдается еще общее *свечение ночного неба*, вызванное как возбуждением за счет столкновений, так и флуоресценцией газов атмосферы в

результате фотовозбуждения (это свечение наблюдается вскоре после захода Солнца).

Мы закончили обзор строения верхних слоев атмосферы. Остается добавить, что в настоящее время все они доступны прямому изучению приборами, доставляемыми на самолетах (до 15—20 км), аэростатах (до 40 км), геофизических ракетах (до 250 км), искусственных спутниках Земли (до границ атмосферы).

Кстати, а что считать границей атмосферы? Исследования последних лет показали, что ионосфера простирается до высот в тысячи и десятки тысяч километров. Поэтому понятие границы атмосферы весьма условно. Часто принимают высоту этой границы в 2000 км. То, что выше, называют *протоносферой* — оболочкой, состоящей из ядер атомов водорода — протонов. За пределами атмосферы находятся радиационные пояса Земли. Систему частиц, захваченных магнитным полем нашей планеты и движущихся вдоль его силовых линий, принято называть *магнитосферой* Земли.

Сведения о давлении, плотности и температуре атмосферы до высоты 700 км приведены в Приложении 1 в конце книги.

§ 3. УСЛОВИЯ НАБЛЮДЕНИЙ, ВЫСОТЫ И СКОРОСТИ СЕРЕБРИСТЫХ ОБЛАКОВ

Как мы уже говорили, серебристые облака наблюдаются только на фоне сумеречного сегмента. Происходит это потому, что они светятся в основном отраженным светом Солнца, хотя, как подробнее будет сказано ниже, часть посылаемых ими лучей, возможно, рождается в процессе флуоресценции — переизлучения энергии, получаемой от Солнца, на других длинах волн. Для осуществления отражения, рассеяния и флуоресценции необходимо, чтобы солнечные лучи освещали серебристые облака. Зная их высоту над земной поверхностью (в среднем 83 км), нетрудно рассчитать, что для этого погружение Солнца под горизонт не должно превышать 19,5 градуса. С другой стороны, если Солнце погрузилось под горизонт менее чем на 6 градусов, еще слишком светло (гражданские сумерки) и серебристые облака, если они не очень яркие, неразличимы. Таким образом, наиболее благоприятные условия для наблюдения серебристых облаков соответствуют времени так называемых навигационных и астрономических сумерек, и вероятность обнаружить их тем больше, чем длительнее эти су-

мерки. Такие условия создаются летом на средних широтах. Именно на средних широтах с конца мая до середины августа чаще всего и наблюдаются серебристые облака.

Такое совпадение двух периодов — наиболее благоприятных условий для наблюдений и наиболее частых появлений серебристых облаков — долгое время сбивало с толку исследователей. Многие ошибочно полагали, что серебристые облака наблюдаются летом в средних широтах только потому, что в это время и как раз на этих широтах создаются благоприятные условия для их видимости (в высоких широтах летом — полярный день, а ближе к экватору очень короткие сумерки). Только во второй половине 50-х годов удалось доказать, что это совпадение — чисто случайное (хотя и очень выгодное для наблюдателей), а на самом деле серебристые облака образуются именно в летний период и именно в средних широтах, потому что в это время на этих широтах происходит значительное похолодание в области мезопаузы и создаются необходимые условия для образования на этом уровне кристалликов льда, из которых и состоят серебристые облака. Подробнее об этом будет рассказано ниже.

Можно считать, что серебристые облака в основном наблюдаются в интервале широт 50—65°. Известны редкие случаи их наблюдения на более низких широтах — до 45°. А вот на широте Ашхабада (38°) за 700 ночей наблюдений И. С. Астапович не замечал их ни разу.

Анализ данных каталога появлений серебристых облаков, составленного Н. П. Фаст на основании 2000 наблюдений за 1885—1964 гг., дает такое распределение пунктов наблюдения по широтам:

Широта	<50°	50—55°	55—60°	>60°
Число наблюдений (в процентах)	3,8	28,1	57,4	10,8

Крайние широты мест наблюдений в северном полушарии: от 45° (пос. Сам Казахской ССР, март — май) до 77° (Дерманкшан, Гренландия, сентябрь — октябрь), а в южном полушарии от 52° (Фолклендские — Мальвинские острова), до 80° (Станция Берд, Антарктида, март). Нужно, однако, иметь в виду, что наблюдения серебристых облаков в южном полушарии пока немногочисленны.

Если говорить о распределении появлений серебристых облаков по сезонам, то самые различные материалы за разные годы показывают практически одну и ту же картину. В северном полушарии серебристые облака наблюдаются

с марта по октябрь, но количество их появлений в марте, апреле, первой половине мая, второй половине августа, сентябре и октябре весьма мало. Период, наиболее удобный для наблюдений,— с конца мая до середины августа. Максимум видимости серебристых облаков довольно уверенно приходится на 5 июля (рис. 4).

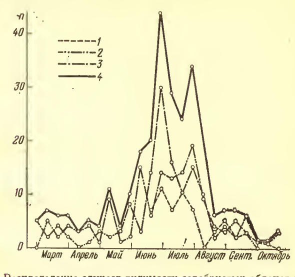


Рис. 4. Распределение случаев видимости серебристых облаков по месяцам по данным станций Гидрометслужбы СССР: *1* — 1957 г., *2*—1958 г., *3*—1959 г., *4* — суммарно за три года.

Рассмотрим теперь распределение серебристых облаков по высоте. Советскими и зарубежными учеными было разработано несколько методов определения высот серебристых облаков по фотографиям, снятым из двух пунктов. Основная заслуга в разработке этих методов принадлежит К. Штермеру (Норвегия), М. И. Бурову, М. А. Дирикису, Ю. Л. Францману (СССР), Г. Витту (Швеция). Все эти методы достаточно сложны, чтобы излагать их в научно-популярной книге *). Мы ограничимся лишь изложением идеи этих методов.

Пусть два наблюдателя A и B (рис. 5) в один и тот же момент фотографируют серебристое облако C (точнее, какую-то заметную деталь облака), высоту которого H надо

*) Подробное изложение этих методов можно найти в книге: *Бронштэн В. А., Гришин Н. И.* Серебристые облака.— М.: Наука, 1970.

определить. Расстояние между наблюдателями (базис) равно d. Путем измерений положения облака на фотопластинках (или пленках) определяют угол параллактического смещения деталей облака γ. Теперь рассмотрим два частных случая:

Первый случай. Базис находится в плоскости AOC (именно так расположили свой базис В. К. Цераский и А. А. Белопольский в 1885 г.). Тогда задача — плоская, что сильно упрощает ее решение. В треугольнике ABC нам известна сторона $AB=d$ и все три угла. Это дает возможность найти расстояния $AC=r_1$ и $BC=r_2$ по формулам

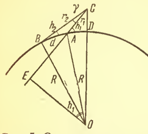


Рис. 5. Определение высоты серебристых облаков по методу В. К. Цераского.

$$r_1 = d\frac{\sin h_2}{\sin \gamma}; \quad r_2 = d\frac{\sin h_1}{\sin \gamma}, \quad (4)$$

где h_1, h_2 — угловые высоты детали облака над горизонтом из точек A и B соответственно. Поскольку базис d обычно измеряется десятками километров, на таком расстоянии Землю можно считать плоской. Но расстояние до проекции серебристого облака D измеряется уже сотнями километров, и тут надо учитывать кривизну земной поверхности. Чтобы определить высоту точки C над поверхностью Земли, рассмотрим треугольник OAC (O — центр Земли). В нем нам известны стороны $OA=R$ (радиус Земли) и $AC=r_1$, а также угол $OAC=90°+h_1$. Этого достаточно, чтобы найти неизвестную сторону $OC=R+H$, а значит и H:

$$H = R\left[\frac{\cos h_1}{\cos(h_1+\psi_1)} - 1\right]; \quad \operatorname{tg}(h_1+\psi_1) = \frac{r_1 + R\sin h_1}{R\cos h_1}. \quad (5)$$

Здесь используется вспомогательный угол $\psi_1 = AOC$ при центре Земли.

Второй случай. Базис расположен перпендикулярно направлению на облако. Тогда плоский треугольник ABC (обозначения прежние) — равнобедренный, причем каждый из углов при точках A и B равен $90° - \frac{\gamma}{2}$. По теореме синусов будем иметь

$$r_1 = r_2 = d\frac{\cos\frac{\gamma}{2}}{\sin\gamma}, \quad (6)$$

после чего высота H находится по формулам (5).

Разумеется, в действительности все обстоит гораздо сложнее. Для определения h_1, h_2 и γ нужно «привязать» изображения деталей серебристых облаков к звездам с известными координатами (в экваториальной системе) либо к земным ориентирам, координаты которых (в горизонтальной системе) определяются из специальных измерений. Для обработки измерений надо знать точный масштаб снимка, а для этого, в свою очередь,— фокусное расстояние объектива камеры. Задача в общем виде не плоская, как в наших двух примерах, а пространственная. Наконец, необходимо учитывать рефракцию (преломление лучей в земной атмосфере).

Большие ряды измерений высот серебристых облаков были выполнены О. Иессе в 1889—1891 гг. (395 измерений), К. Штермером в 1932—1934 гг. (78 измерений), Г. Виттом в 1958 г. (588 измерений), М. А. Дирикисом, Ю. Л. Францманом и их сотрудниками в 1959—1964 гг. (137 измерений), М. И. Буровым в 1964 г. (366 измерений), Г. Виттом в 1965—1967 гг. (2588 измерений), Н. Ауфм-Ордтом, И. Нейсером и Г. Буллом в 1967—1972 гг. (420 измерений). Средняя высота по 4586 измерениям составляет 82,97 км.

Что касается крайних значений, то по данным большинства авторов высоты серебристых облаков заключены между 73,5 км и 94,5 км. Такой диапазон высот получен в работе Н. Ауфм-Ордта и его сотрудников, остальные высоты лежат внутри этого диапазона. Исключение составляют измерения М. И. Бурова в 1965 г. (281 измерение), которые лежат в несколько более широком диапазоне: 73,0—96,8 км. Причиной такого разброса высот могут быть как реальные их различия, так и ошибки измерений (или вычислений). Но ошибки измерений, по данным М. И. Бурова, не превосходят ± 1 км, следовательно, разброс высот реален.

Более того, есть вполне надежные данные, что диапазон высот серебристых облаков в разные периоды времени изменяется. Так, летом 1958 г. независимые измерения проводили М. И. Буров (в Эстонии) и Г. Витт (в южной Швеции). Первый получил диапазон высот $80{,}5 \div 85{,}0$ км, второй $81{,}1 \div 85{,}5$ км. Это значит, что условия для образования серебристых облаков в это время и в данном регионе реализовались именно в таком узком интервале высот. Напротив, в 1964—1965 гг., как показывают независимые измерения М. И. Бурова, с одной стороны, и М. А. Дирикиса с сотрудниками, с другой, диапазон высот серебристых облаков был весьма широк: от 73 до 97 км. Обе группы наблюдали в одном регионе: в Эстонии и в Латвии.

Как измерения высот, так и замедленная киносъемка серебристых облаков, осуществленная впервые Н. И. Гришиным, показали, что наблюдаются случаи появления двух слоев в серебристых облаках, один над другим, порой имеющих различные направления и скорости движения.

На рис. 6 показано распределение серебристых облаков по высоте на основании 695 измерений, выполненных О. Иессе, К. Штермером, М. И. Буровым, М. А. Дирикисом, С. В. и Ю. Л. Францманами в 1887—1964 гг. На рис. 7 показано такое же распределение по 420 измерениям Н. Ауфм-Ордта и его коллег в 1967—1974 гг. Обе диаграммы показывают резкий максимум распределения на высоте 83 км, но наблюдения ученых из ГДР дают более пологий ход и вторичный максимум на высоте 88 км. Намечается также более слабый третий максимум на высоте около 77 км.

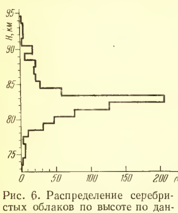


Рис. 6. Распределение серебристых облаков по высоте по данным 695 измерений за 1887—1964 гг.

Серебристые облака являются удобным средством изучения скоростей и характера атмосферных течений на высотах 75—90 км. Еще О. Иессе в конце 80-х годов прошлого века обнаружил, что скорости движения серебристых облаков весьма велики: от 40 до 177 м/с. Последующие измерения подтвердили это заключение. М. И. Буров по измерениям 1964—1965 гг. нашел более широкий диапазон наблюдаемых скоростей: 17÷262 м/с. По 178 определениям за 1885—1965 гг. мы в 1970 г. получили среднее значение скорости 65 м/с. Американский исследователь Б. Фогль по 97 определениям за те же годы определил средний азимут перемещения серебристых облаков 240°, считая от точки севера к востоку (такой азимут называется геодезическим, в отличие от астрономического азимута, считаемого от юга к западу; оба азимута отличаются на 180°). Таким образом, преимущественное направление воздушных течений на уровне мезопаузы — с северо-востока на юго-запад.

Распределение скоростей серебристых облаков показано на рис. 8. Отчетливо виден максимум у значения скорости 60 м/с и несколько слабых вторичных максимумов на больших скоростях.

Ряд исследователей обратили внимание на то, что в течение одной и той же ночи направление движений серебристых облаков меняется. Каких-либо общих закономер-

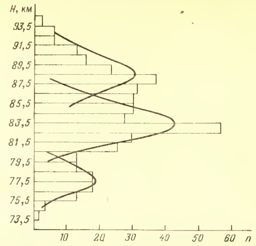


Рис. 7. Распределение серебристых облаков по высоте по 420 измерениям Н. Ауфм-Ордта и др. за 1967—1974 гг.

ностей этих изменений пока не обнаружено, в разные ночи наблюдается различная картина.

В 1938 г. Г. О. Затейщиков и В. А. Бронштэн обнаружили по измерениям фотографий циклонические движения



Рис. 8. Распределение скоростей серебристых облаков (по В. А. Бронштэну и Н. И. Гришину).

в серебристых облаках с радиусом завихрения 20—70 км. Эти результаты были позднее подтверждены методом замедленной киносъемки серебристых облаков.

Помимо горизонтальных движений, в полях серебристых облаков наблюдаются и вертикальные движения. Согласно измерениям М. И. Бурова, а также М. А. Дирикиса с сотрудниками, средняя скорость вертикальных движений 10 м/с, причем восходящие и нисходящие движения встречаются одинаково часто.

Однако, помимо описанных здесь реальных движений серебристых облаков, в них наблюдаются еще кажущиеся волновые движения, связанные не с перемещением частиц, а с перемещением волн плотности в облачных полях. Для того чтобы познакомиться с этими явлениями, нам нужно рассмотреть морфологию серебристых облаков, изучить их структуру. Эти вопросы будут изложены в следующем параграфе.

§ 4. МОРФОЛОГИЯ И СТРУКТУРА СЕРЕБРИСТЫХ ОБЛАКОВ

Существует много различных структурных форм серебристых облаков. В 1955 г. Н. И. Гришин предложил морфологическую классификацию этих форм, которая в дальнейшем была положена в основу международной классификации. Ниже мы приводим ее по книге В. А. Бронштэна и Н. И. Гришина «Серебристые облака» (М.: Наука, 1970).

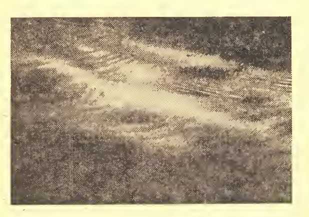


Рис. 9. Флер и системы гребешков в серебристых облаках 10—11 июля 1951 г. Фотография повернута на 180° (фото Н. И. Гришина).

Тип I. Флер. *Флер*— однородная или неоднородная пелена — наиболее простая форма серебристых облаков. Отдельно, без наличия других форм, флер может заметить только

опытный наблюдатель по тонким признакам свечения отдельных участков фона сумеренного неба. Заполняя пространство между деталями других типов, флер отличается своим туманообразным строением и нежно-белым с голубоватым оттенком мерцающим сиянием. Флер нередко предшествует (за полчаса-час) появлению других форм серебристых облаков с более развитой структурой. Порою можно наблюдать, как гребешки и другие детали появляются как бы в разрывах флера и просвечивают сквозь него (рис. 9).

Тип II. Полосы. Группа II-а. *Полосы размытые*, расположенные группами по нескольку штук, параллельные друг другу или переплетающиеся между собой под небольшим углом. Иногда одна из таких полос наблюдается отдельно. С течением времени полосы мало изменяются по форме. При рассматривании в бинокль контуры их остаются размытыми. Такие размытые малоподвижные полосы часто составляют структуру всего поля или господствуют над другими формами, особенно при небольшой яркости и площади распространения серебристых облаков. Видимые очертания размытых полос, по-видимому, образуются, как и некоторые другие формы, при подходящих условиях из массы

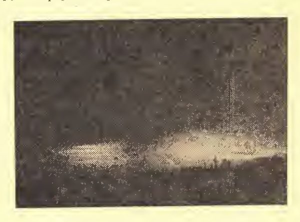


Рис. 10. Полосы в серебристых облаках 20—21 июня 1961 г. Видна темная «ложбина» (фото Б. С. Мамонтова).

флера (рис. 10). В тех случаях, когда эти полосы расположены в направлении на наблюдателя, отмечается явление перспективной радиации этих полос, иначе говоря, они расходятся как бы из некоторой точки, подобной радианту метеорного потока.

Группа II-b. *Полосы резко очерченные*, наподобие узких струек, наблюдаются в основном у серебристых облаков с большой яркостью и при наличии других хорошо развитых форм (рис. 11). Такие полосы (струи) иногда разветвляются на две и большее число более узких струек облаков. При наблюдениях иногда создается впечатление, что эти полосы возникли в результате увлечения потоком воздуха отдельных участков серебристых облаков (флера)



Рис. 11. Струи в серебристых облаках (фото Н. И. Гришина).

и растягивания их в направлении движения потока. Однако полосы могут иметь и другое расположение относительно направления их движения, вплоть до перпендикулярного к направлению дрейфа. В этом случае они, по-видимому, выражают волновой характер движения серебристых облаков.

Тип III. Волны. Группа III-a. *Гребешки* — часто расположенные, узкие, короткие, резко очерченные параллельные полосы наподобие легкой ряби на поверхности воды при небольшом порыве ветра. Благодаря небольшому расстоянию между соседними полосками ребристая поверхность последних для невооруженного глаза имеет почти одинаковую яркость (рис. 9).

Группа III-b. *Гребни* имеют бо́льшие размеры по сравнению с гребешками и четко выраженное неравномерное распределение яркости в поперечном направлении с хорошо заметными признаками волновой природы этих образований. Расстояние между соседними гребнями в

10—20 раз больше, чем у гребешков. Гребни часто располагаются между полосами и поперек ряда полос. Гребни встречаются особенно часто на краю поля серебристых облаков, образуясь непосредственно в массе флера. Группируясь по нескольку штук, гребни в этом случае образуют подобие птичьего пера (рис. 9, 12).

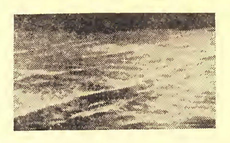


Рис. 12. Гребни и другие волновые образования в серебристых облаках 10—11 августа 1958 г. Фотография повернута на 180° (фото Г. Витта).

Группа III-с. *Волнообразные изгибы* светящейся поверхности серебристых облаков. Изгибы не составляют индивидуальной формы, но образуются в результате искривления поверхности, занятой другими формами (полосами, гребешками). Волнообразные изгибы встречаются в серебристых облаках, имеющих большую площадь распространения.

Изгибы имеют четко выраженный волновой фазовый характер движения. Расстояние между соседними гребнями воздушных волн, вызывающих изгибы поверхности серебристых облаков, меняется порой в широких пределах (см. рис. 12).

Тип IV. Вихри. Группа IV-а. *Завихрения* с малым радиусом (0°,1—0°,5). Завихрениям подвергаются полосы, гребешки (II, III) и иногда флер. Величина угла завихрения детали меняется от десятков градусов к первоначальному направлению до полного скручивания ее в кольцо с темным пространством в середине, иногда внешне напоминающее лунный кратер.

Группа IV-b. Завихрения в виде простого изгиба одной или нескольких полос в сторону от их первоначального направления с поворотом до 180°. Обнаруживаются в серебристых облаках с преимущественно полосатым и струйчатым строением (II-a, II-b), сохраняя поступательное движение образовавшей вихрь полосы. Завихрение встре-

чается в районе расположения и других форм серебристых облаков, например, флера, гребней (рис. 9).

Группа IV-с. Мощные *вихревые выбросы* светящейся материи в сторону от основного облака. У основания такие вихри обычно соединяются с яркими полосами, откуда, по-видимому, и получают материю для своего формирования и развития. Это редкое образование в серебристых облаках характерно быстрой изменчивостью своего вида и формы. Крупные вихри, образуясь в районе расположения других форм, обычно резко нарушают общий режим движений в поле серебристых облаков (рис. 13).

Рассмотрим теперь более подробно взаимосвязь отдельных структурных форм серебристых облаков, их действительное строение и вероятные пути образования.

Флер, как уже отмечалось, является своего рода предвестником появления других, более сложных форм, хотя иногда он так и остается единственной формой серебристых облаков, имея обычно довольно малую яркость. Такие наблюдения вызывают порой сомнения в их достоверности. Применение светосильного бинокля с большим полем зрения обычно позволяет разрешить сомнения: в бинокль флер виден лучше, увереннее отмечается его клочковатость и легкое, мерцающее сияние.

Полосы и струи генетически связаны с эволюцией флера. По-видимому, происходит увлечение воздушными течениями некоторой массы флера и образование из него широких туманообразных полос. С расстояния 600—700 км они кажутся достаточно резко очерченными, но ближе, со 100 км, выглядят туманными и размытыми. Возможно, что при наличии в мезосфере локальных струйных течений флер вытягивается в довольно резко очерченные полосы и струи (см. рис. 11).

Особого внимания заслуживают *волновые образования* в серебристых облаках. Облачный слой толщиной около 1 км располагается по волновой поверхности мезопаузы, воспроизводя волновые колебания пограничного, наиболее холодного слоя мезопаузы (см. рис. 12).

Волновые процессы в мезосфере играют важнейшую роль в понимании физической природы серебристых облаков. При их изучении рекомендуется использовать фотографии, перевернутые «вверх ногами». Тогда волновая поверхность серебристых облаков будет рассматриваться так же, как человек привык видеть волны на поверхности моря (в том и в другом случае наиболее близкие к нам участки волновой поверхности будут в нижней части снимка, что и

усиливает аналогию). Примеры таких снимков представлены на рис. 12, 14, 15. На рис. 14 для усиления впечатления фотографии превращены в трехмерные изображения

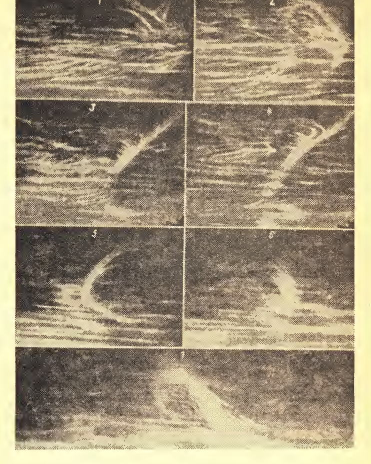


Рис. 13. Развитие вихря в поле серебристых облаков 6—7 июля 1951 г. (фото Н. И. Гришина).

путем обрезания их по контуру вертикальными плоскостями. На рис. 15 то же впечатление достигается с помощью темной полосы, как бы лежащей на волновой поверхности. Здесь хорошо видны две волны типа III-b и множество волн типа III-a.

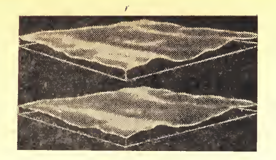


Рис. 14. «Трехмерное» изображение серебристых облаков, показывающе волновые образования в них.



Рис. 15. Волновая поверхность серебристых облаков. Фотография повернута на 180°. Темная полоса показывает сечение волновой поверхности вертикальной плоскостью.

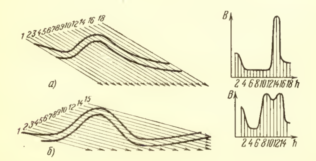


Рис. 16. Схема прохождения лучей Солнца сквозь серебристые облака при разных углах падения луча. Справа показаны соответствующие распределения яркости (B) в функции угловой высоты (h).

Волновое искривление облачного слоя ведет к изменению его видимой яркости. Фотометрический контур сечения волны в серебристых облаках будет меняться в зависимости от ориентировки волны относительно наблюдателя. Схематически это показано на рис. 16. Мы видим, что луч зрения может пройти сквозь один, два и даже три слоя облачной поверхности. Чем больший путь проходит луч в облачной массе, тем больше будет яркость данного участка поля облаков.

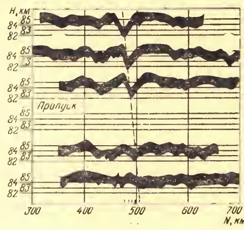


Рис. 17. Сечения облачного поля 10—11 августа 1958 г. вертикальной плоскостью через пятиминутные интервалы (по Г. Витту).

Расстояние между гребешками, как показали измерения, колеблется от 6 до 12 км, составляя в среднем 7,2 км (по 400 измерениям). По данным американского исследователя Б. Фогля наибольшее количество волновых образований в серебристых облаках приходится на длину волны 10 км, что мало отличается от среднего расстояния между гребешками. Иногда это расстояние меняется за несколько минут, волны как бы пульсируют.

В 1962 г. шведский ученый Г. Витт, используя стереопары фотографий, полученных с концов базиса, построил несколько сечений облачного поля вертикальной плоскостью. Они приведены на рис. 17. Эти сечения построены с 5-минутными интервалами. Видно, что на основные волны с длиной около 50 км и амплитудой до 4 км накладывались малые волны с длиной 5—10 км и амплитудой 0,5—1 км. Аналогичные случаи не раз регистрировались и советскими наблюдателями.

Волновые образования в серебристых облаках не остаются неподвижными, они все время перемещаются. При этом некоторые волны исчезают, другие образуются вновь, как это хорошо видно на рис. 17. Еще лучше и нагляднее это заметно при просмотре замедленной киносъемки поля серебристых облаков.

Характер волновых движений может быть таков, что перемещения тех или иных деталей, особенно узлов плотности и «гребней» волн, могут быть лишь кажущимися, не связанными с реальными перемещениями вещества облаков, а вызванными подъемом и опусканием волновой поверхности. Наблюдателям серебристых облаков необходимо об этом помнить.

Существуют две точки зрения на происхождение волновой структуры в серебристых облаках. Одна из них связывает возникновение этой структуры с распространением вверх так называемых волн Гельмгольца, вызываемых разрывом или скачком ветра на границе двух воздушных слоев разной температуры. Согласно другой гипотезе, причиной волновой структуры являются внутренние гравитационные волны, возникающие при обтекании горных хребтов, а также гребней антициклонов (областей повышенного давления атмосферы). При определенных условиях они могут достигать уровня мезопаузы и порождать наблюдаемую структуру серебристых облаков.

§ 5. ОПТИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА СЕРЕБРИСТЫХ ОБЛАКОВ

Геометрические условия освещения. Рассмотрим подробнее, чем раньше, условия освещения поля серебристых облаков Солнцем. Пусть (рис. 18) в точке C на высоте H над земной поверхностью AB находится серебристое облако. Пусть погружение Солнца под горизонт (его отрицательная высота), т. е. угол NDS, равно $h_{\odot}$. Из чертежа видно, что и $\angle AOB = h_{\odot}$. Луч Солнца, касающийся земной поверхности, идет по направлению SBC. Очевидно, что точки облака, находящиеся левее C, т. е. выше над горизонтом наблюдателя A, окажутся в тени Земли и видны не будут (эта область заштрихована).

Найдем максимальную угловую высоту $h_{\max}$ серебристого облака в меридиане Солнца (наш чертеж и весь расчет сделаны именно для этой плоскости). Из $\triangle OBC$ найдем вспомогательный угол $BOC = \psi$:

$$\psi = \arccos \frac{R}{R+H}. \qquad (7)$$

Опустим из точки A перпендикуляр AK на прямую OC. Тогда $\angle NAK = \angle AOC = h_{\odot} - \psi$ и $\angle CAK = h_{max} + (h_{\odot} - \psi)$. Из $\triangle AOK$ будем иметь

$$\operatorname{tg}(h_{max} + h_{\odot} - \psi) = \frac{1 + \frac{H}{R} - \cos(h_{\odot} - \psi)}{\sin(h_{\odot} - \psi)}. \qquad (8)$$

По этой формуле для любого $h_{\odot}$ можно найти h_{max}. Если положить $H = 82$ км, то $\psi = 9°09'$, $H/R = 0{,}01288$. При использовании формулы (8) нужно ввести в значение $h_{\odot}$ поправку за рефракцию, которая для касательного луча равна удвоенной горизонтальной рефракции, т. е. $\Delta h_{\odot} = -1°09'$. Поэтому положим

$$h_{\odot} = h'_{\odot} + \Delta h_{\odot}, \qquad (9)$$

где $h'_{\odot}$ — эфемеридное (неискаженное рефракцией) погружение Солнца. Таким образом, данная величина h_{max} будет соответствовать меньшему погружению Солнца под горизонт, чем если бы рефракции не было.

Рис. 18. Условия освещения серебристого облака Солнцем.

Однако солнечные лучи, проходящие у самой поверхности Земли, испытывают весьма сильное поглощение в воздухе, и, как полагали некоторые ученые, вряд ли могут эффективно освещать серебристые облака. Если принять, что только лучи, проходящие выше некоторого уровня H_0, способны освещать их, то вместо формулы (7) мы будем иметь следующее выражение для ψ:

$$\psi = \arccos \frac{R + H_0}{R + H}. \qquad (10)$$

Если, например, $H_0 = 30$ км (уровень слоя озона), то $\psi = 7°16'$ и учитывать рефракцию уже не нужно. Из формулы (8) следует, что если $h_{\odot} = \psi$, то $h_{max} = 90°$, т. е. серебристые облака могут наблюдаться до самого зенита, а при $h_{\odot} < \psi$ они могут переходить через зенит. Такие случаи бывают крайне редко, когда облака достаточно ярки, чтобы наблюдаться при столь малых погружениях Солнца, когда небо еще довольно светлое.

Напомним, что погружению Солнца на 6° соответствует конец *гражданских сумерек*, когда на небе появляются самые яркие звезды. Промежуток времени между погруже-

нием Солнца на 6 и 12° называется *навигационными сумерками,* а между 12 и 18° — *астрономическими* сумерками. При погружении Солнца сумеречный сегмент все уменьшается и при $h_{\odot}=18°$ исчезает — наступает ночь.

В самом деле, нетрудно показать на основании формул (7) и (8), что при условии $h_{\odot}=2\psi$ получим $h_{max}=0$. Следовательно, серебристые облака могут наблюдаться при $h_{\odot}\leqslant18°,3$, а с учетом рефракции при $h_{\odot}\leqslant19°,5$. Если же принять $H_0=30$ км, то мы получим более строгое условие $h_{\odot}\leqslant14°,5$.

Анализ наблюдений серебристых облаков в 1957—1959 гг. на 200 метеостанциях Гидрометслужбы СССР показал, что облака наблюдались в интервале $h_{\odot}$ от 2° до 21° (в 1958—1959 гг.— только до 19°). Это означает, что $H_0<30$ км и весьма близко к нулю. Правда, здесь примешивается еще один фактор. До сих пор во всех расчетах мы принимали $H=82$ км, тогда как истинная высота серебристых облаков может быть и больше. Так, переход к $H=90$ км увеличит допустимое $h_{\odot}$ еще на один градус.

Возможность различить серебристое облако на фоне сумеречного неба зависит не только от яркости самого облака B_c, но и от яркости фона неба $B_н$, а точнее, от величины контраста между ними K:

$$K=\frac{B_c-B_н}{B_c}. \qquad (11)$$

Как нетрудно заметить, величина K может изменяться в пределах от $K=0$ ($B_c=B_н$) до $K=1$ ($B_н=0$). Но мы уже видели, что на совершенно темном небе серебристые облака наблюдаться не могут, так как тогда они не будут освещены солнечными лучами. Наибольшее отмеченное при наблюдениях значение контраста равно 0,70 (серебристые облака в 3,3 раза ярче фона неба).

Яркость серебристых облаков. Определения яркости серебристых облаков в абсолютных единицах неоднократно производились визуально и по фотографиям. По многим определениям за 1936—1961 гг. яркость серебристых облаков заключается в пределах от 10^{-8} до $3\cdot10^{-4}$ стильба. Напомним, что стильб (сб) — это яркость объекта, освещенность которого равна 10^4 люксов (лк) на стерадиан. Так, яркость диска Солнца вне атмосферы равна $2\cdot10^5$ сб, освещенность от него (опять-таки вне атмосферы) площадки, перпендикулярной к лучам Солнца, равна 136 000 лк, а яркость абсолютно белого экрана, поставленного перпендикулярно лучам Солнца на границе

атмосферы, равна

$$\frac{136\,000}{10\,000\pi} = 4{,}3\ \text{сб}.$$

На всякий случай приведем соотношение стильба для ночного зрения человека с энергетическими единицами (это соотношение вообще зависит от спектральной чувствительности глаза или иного приемника излучения): 1 сб $= 5{,}8 \cdot 10^{-4}$ Вт/ (см^2·ср).

Яркость диска полной Луны в среднем в 500 000 раз меньше яркости диска Солнца и, значит, равна (за пределами атмосферы) 0,4 сб. Сквозь атмосферу яркость Луны будет казаться меньше, в зависимости от ее высоты над горизонтом и прозрачности воздуха. Для средних условий прозрачности и высоты 45° яркость полной Луны будет около 0,2 сб. Значит, даже самые яркие серебристые облака в тысячу раз слабее диска полной Луны.

С другой стороны, яркость ночного безлунного неба равна примерно 10^{-9} сб. (Она не равна нулю из-за слабого свечения газов в верхних слоях атмосферы.) Это значит, что самые слабые серебристые облака лишь в 10 раз ярче ночного неба.

Видимое альбедо и оптическая толщина. Понятие *альбедо* хорошо известно любителям астрономии — оно характеризует отражательную способность небесных тел, освещаемых извне (например, планет). Существует несколько разных понятий альбедо в зависимости от определения. В частности, *видимым альбедо* называется отношение яркости данной поверхности, освещенной лучами Солнца, к яркости абсолютно белого экрана, расположённого перпендикулярно к солнечным лучам в том же месте, что и данная поверхность. Поэтому видимое альбедо серебристых облаков определяется формулой

$$A_в = \frac{B_с - B_н}{4{,}3} \cdot \frac{1}{T_1 T_2}, \qquad (12)$$

где 4,3 — яркость абсолютно белого экрана в стильбах, T_1 и T_2 — коэффициенты пропускания земной атмосферы для лучей «Солнце — облако» и «облако — наблюдатель» соответственно.

Как показало исследование О. Б. Васильева в 1967 г., видимое альбедо серебристых облаков максимально на высоте 2°, где оно равно $3 \cdot 10^{-6}$ и быстро ослабевает с увеличением высоты в среднем по гиперболической кривой (испытывая в то же время ряд флуктуаций) — до 10^{-7}. Такие

низкие значения альбедо связаны не с тем, что серебристые облака состоят из «абсолютно черных» частиц (напротив, альбедо этих частиц, скорее всего, весьма высокое — до 0,9), а с их «пористостью»: частицы в серебристых облаках расположены очень редко (их концентрация не превосходит 1 $см^{-3}$, т. е. одной частицы на кубический сантиметр), размеры же частиц очень малы — доли микрометра.

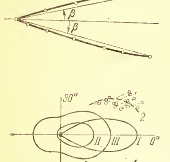


Рис. 19. Индикатрисы рассеяния для частиц разного размера (по К. С. Шифрину) и для частиц серебристых облаков: I—r=0,25 мкм, II—r=0,10 мкм, III—r=0,05 мкм, 1 — индикатриса рассеяния серебристых облаков по О. Б. Васильеву, 2 — то же по Ч. И. Виллманну.

Сделаем несложный расчет. Пусть облако состоит из одинаковых частиц диаметром 10^{-5} см (именно таковы их примерные размеры) при указанной выше концентрации. Толщина облачного слоя пусть будет 2 км = $=2\cdot10^5$ см. Мы наблюдаем облако на высоте 2°, так что путь луча в облаке в 6 раз больше толщины облачного слоя. Площадь каждой частицы будет порядка 10^{-10} $см^2$. На пути $6\cdot2\cdot10^5$ см$=1{,}2\cdot10^6$ см луч зрения в сечении 1 $см^2$ встретит столько же $(1{,}2\cdot10^6)$ частиц (ведь на кубический сантиметр у нас приходится одна частица), а их общая отражательная поверхность составит примерно 10^{-4} $см^2$, т. е. 10^{-4} от сечения в 1 $см^2$, для которого мы делаем расчет. Эта величина — 10^{-4} — верхний предел видимого альбедо облаков, поскольку мы не учли ослабления луча Солнца, освещающего облако, а также отличия альбедо частиц от единицы. Кроме того, концентрация частиц может быть гораздо меньше принятой в расчете — нередко в 100 раз. Но есть и еще один важный фактор, сильно понижающий видимое альбедо, особенно при больших угловых высотах. Дело в том, что частицы серебристых облаков, как и любые другие, рассеивают солнечные лучи по разным направлениям в различной степени. Если отложить из частицы как из центра во все стороны векторы, длина которых будет пропорциональна количеству рассеянного в данном направлении света, то, соединив концы этих векторов, мы получим фигуру, напоминающую баклажан или грушу, которая называется *индикатрисой рассеяния*. Впрочем, поскольку эта фигура сим-

метрична относительно падающего солнечного луча, достаточно изобразить ее сечение плоскостью, проходящей через направление освещающего луча. На рис. 19 изображен ряд теоретических индикатрис рассеяния, построенных К. С. Шифриным для частиц разного размера. Так, кривая *I* соответствует частицам с радиусом $r=0{,}25$ мкм, кривая *II* — с $r=0{,}10$ мкм, кривая *III* — с $r=0{,}05$ мкм. Мы видим, что чем крупнее частицы, тем более вытянута индикатриса рассеяния вперед. Это значит, что крупные частицы основную долю падающих лучей рассеивают не назад, как отражающий экран, а вперед. Именно поэтому серебристые облака, расположенные ближе к горизонту, кажутся ярче — ведь Солнце расположено за ними, и направление «облако — наблюдатель» и есть для них направление вперед.

Там же, на рис. 19, нанесены индикатрисы рассеяния, полученные О. Б. Васильевым (кривая *1*) и Ч. И. Виллманном (кривая *2*). Наблюдения не позволили получить всю индикатрису, и поэтому изображены только ее отрезки. Можно заметить, однако, что индикатриса О. Б. Васильева сильнее вытянута вперед и походит на теоретическую кривую *I*, тогда как индикатриса Ч. И. Виллманна — более гладкая и походит на кривую *II*. Это связано, по-видимому, с различием в размерах частиц: в ночь 31 июля — 1 августа 1957 г. средний радиус частиц, по определению О. Б. Васильева, составил $r=0{,}75$ мкм, тогда как Ч. И. Виллманн из наблюдений 30—31 июля 1959 г. определил $r=0{,}1$ мкм. Такие различия в принципе вполне возможны, и мы еще вернемся к этому вопросу.

В свое время В. К. Цераский был обеспокоен возможностью неучтенного поглощения света звезд серебристыми облаками. В наше время стало возможным определять оптическую толщину серебристых облаков из наблюдений. Напомним, что *оптическая толщина* τ связана с коэффициентом пропускания T соотношением

$$\tau = -\ln T, \qquad (13)$$

иначе говоря, $\tau=1$, если оптическая среда поглощает долю $1/e$ падающего излучения ($e=2{,}718\ldots$ — основание натуральных логарифмов).

Методы фотографической фотометрии и лазерного зондирования серебристых облаков в СССР и США дали в хорошем согласии друг с другом значения τ от $2\cdot10^{-6}$ до $5\cdot10^{-4}$. Поскольку ослабление блеска звезды в звездных

величинах Δm равно

$$\Delta m = -2{,}5 \lg T, \qquad (14)$$

а соотношение между натуральным и десятичным логарифмом таково, что $\ln T \approx 2{,}30 \lg T$, то из сравнения (13) и (14) ясно, что величина Δm в звездных величинах близка к τ. Таким образом, ослабление звезд серебристыми облаками ничтожно и составляет десяти- и стотысячные, а иногда даже миллионные доли звездной величины. Никакой сверхточный фотоэлектрический фотометр не в состоянии зарегистрировать подобные изменения блеска, так что опасения В. К. Цераского были совершенно напрасны.

Поляризация света. Теория рассеяния света крупными частицами*) показывает, что рассеянный ими свет должен быть частично поляризован, т. е. световые колебания будут происходить не равномерно во всех плоскостях, перпендикулярных к лучу, а будут группироваться ближе к плоскости рассеяния, проходящей через падающий и рассеянный лучи, или к плоскости, ей перпендикулярной. В первом случае поляризация считается отрицательной, во втором — положительной. Если перпендикулярную и параллельную плоскости рассеяния компоненты поляризованного света обозначить соответственно через I_1 и I_2, то степень поляризации, по определению, будет равна

$$p = \frac{I_1 - I_2}{I_1 + I_2}. \qquad (15)$$

Величина p часто выражается в процентах.

Измерения советских исследователей Т. М. Тарасовой, О. Б. Васильева, Ч. И. Виллманна, шведского наблюдателя Г. Витта и других показывают, что степень поляризации серебристых облаков обычно заключена в пределах от 2 до 50%, но, как правило, растет с углом рассеяния ϑ (угол BCA на рис. 18). По кривой изменения $p(\vartheta)$ можно определить важный параметр

$$\alpha = \frac{2\pi r}{\lambda}, \qquad (16)$$

где λ — длина волны излучения, а по параметру α — средний радиус частиц r. Расчеты Ч. И. Виллманна и Г. Витта привели к значениям $r = 0{,}12 \div 0{,}15$ мкм, тогда как наблю-

*) Под «крупными» в данном случае подразумеваются частицы, размеры которых существенно больше размеров молекул.

дения О. Б. Васильева, хотя и в узком интервале углов ϑ, ближе соответствовали оценке $r=0{,}75$ мкм, впрочем, в хорошем согласии с его же оценкой по индикатрисе рассеяния (см. выше). Т. М. Тарасова получила $r=0{,}5\div0{,}6$ мкм.

С п е к т р о ф о т о м е т р и я с е р е б р и с т ы х о б л а к о в. Ценную информацию об оптических свойствах серебристых облаков может дать их спектр. С одной стороны, распределение интенсивности отраженных лучей по спектру характеризует их цветовые свойства, что позволит судить о природе слагающих их частиц. С другой стороны, еще в 1923 г. советский астроном И. И. Путилин высказал гипотезу, что серебристые облака не только рассеивают солнечные лучи, но и люминесцируют, т. е. переизлучают солнечную радиацию в других длинах волн, возможно, в виде узких полос излучения.

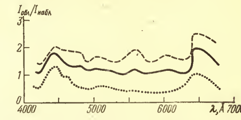


Рис. 20. Спектральное распределение яркости серебристых облаков (по Н. И. Гришину). По оси ординат отложены отношения яркостей облаков и фона неба.

Визуальные наблюдения спектра серебристых облаков, проводившиеся в отдельные годы до войны, не дали надежных результатов. Первые спектрограммы, подвергшиеся тщательной обработке, были получены летом 1951 г. Н. И. Гришиным в Химках (под Москвой). Их обработка показала (рис. 20) отсутствие резких спектральных линий (как в спектрах полярных сияний), глубокий минимум в оранжево-зеленой частях спектра и отдельные максимумы: широкий красный около $\lambda=6500$ Å и три узких синих ($\lambda=4230$, 4480 и 4630 Å).

Совсем иную картину получил в 1966 г. Б. Фогль (рис. 21). Его спектры дали резкий рост интенсивности в синей части с максимумом около 4100 Å и плавный спад к красному концу. Примерно такую же картину получили Б. Фогль и М. Риз в 1972 г.

Гораздо более широкий спектральный интервал удалось охватить в 1976 г. Д. П. Веселову и его сотрудникам: от 0,4 до 1,6 мкм. Кривая показывает плавный спад интен-

сивности в сторону красных и далее инфракрасных лучей, без каких-либо максимумов и минимумов.

Но еще в 1967 г. О. Б. Васильев, используя теорию рассеяния света крупными частицами, развитую в начале века немецким физиком Густавом Ми, показал, что распределение интенсивности в спектре рассеянного излучения сложным образом зависит от отношения длины волны к радиусу частиц λ/r. Когда это отношение меньше единицы, т. е. $r>\lambda$, спектральная кривая может иметь 2—3 максимума вследствие появления в рассеянном свете не только дипольного, но и мультипольного излучения, и взаимодействия их между собой. Если же $r<\lambda$, то кривая плавно спадает к красному концу, приближаясь к закону Рэлея: $I(\lambda)\sim\lambda^{-4}$.

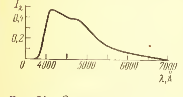


Рис. 21. Спектральное распределение яркости серебристых облаков (по Б. Фоглю).

Таким образом О. Б. Васильев объяснил кажущееся противоречие между результатами Н. И. Гришина и Б. Фогля. Спектры Н. И. Гришина, полученные за четыре ночи лета 1951 г., были образованы сравнительно крупными частицами, примерно с $r\geqslant0{,}5$ мкм, поэтому на них заметны волны ($r>\lambda$). Спектры же Б. Фогля 1966 г., Б. Фогля и М. Риза 1972 г., а также Д. П. Веселова и его сотрудников 1976 г. были образованы сравнительно малыми частицами. Оба спектра Фогля (1966 и 1972 гг.) захватывают еще первый, самый широкий максимум около $\lambda=0{,}4$ мкм; значит, размер частиц при этом был около $r=0{,}3$ мкм. Спектр Д. П. Веселова и др. максимума не содержит, а ход кривой близок к закону Рэлея; значит, размер частиц был тогда еще меньше ($r<0{,}2$ мкм). Поэтому в дальнейшем целесообразно параллельно со спектральными наблюдениями проводить поляриметрические, чтобы иметь возможность определять радиус частиц и строить кривую в функции не λ, а отношения λ/r.

Признаков люминесценции во всех этих работах обнаружено не было, хотя Н. И. Гришин и принимал сперва полученные им максимумы за полосы люминесценции. Позже, в 1967 г., он пытался связать некоторые детали своих спектров с полосами поглощения жидкого кислорода, предположив, что частицы серебристых облаков содержат конгломераты молекул O_2, O_3 и высших полимеров кислорода, но эта гипотеза поддержки не получила.

Мы познакомились с оптическими свойствами серебристых облаков в основном по материалам наземных наблюдений. Однако за последние 10 лет их не раз наблюдали из космоса. Об этих наблюдениях будет рассказано в следующем параграфе.

§ 6. НАБЛЮДЕНИЯ СЕРЕБРИСТЫХ ОБЛАКОВ ИЗ КОСМОСА

Наблюдения и исследования серебристых облаков из ближнего космоса, т. е. с орбит космических кораблей, представляют определенные преимущества перед наземными наблюдениями: почти отсутствует общее поглощение их света в нижних слоях атмосферы, полностью отсутствует поглощение слоем озона и водяным паром, что позволяет регистрировать их ультрафиолетовый и инфракрасный спектр, возможен глобальный охват явления за сравнительно короткое время и т. д.

Впервые оптическое явление, позже идентифицированное как серебристые облака, наблюдал с борта космического корабля «Восход-2» 18—19 марта 1965 г. советский космонавт А. А. Леонов. После этого их наблюдал с борта «Союза-9» 9 июня 1970 г. В. И. Севастьянов. Наблюдавшиеся облака представлялись вытянутыми вдоль горизонта полосами и системами гребешков.

Дальнейшие наблюдения серебристых облаков из космоса были выполнены членом второго экипажа станции «Скайлэб» П. Вейтцем в мае и в первой неделе июля 1973 г. около 50° северной широты, в интервале восточных долгот 10—40° (примерно от Парижа до Харькова). Облака наблюдались за это время четыре раза, они всегда наблюдались внизу в направлении восходящего Солнца, однако никогда Солнце и серебристые облака не наблюдались одновременно. Облака были яркие и образовывали тонкую яркую полосу над земным горизонтом. По мере приближения космического аппарата эта полоса как бы разделилась на две, а затем на четыре тонких слоистых облака, которые, по мере приближения к ним «Скайлэба», поднимались над горизонтом, пока не исчезли в усиливавшемся свечении утреннего неба.

Более систематические наблюдения серебристых облаков были организованы силами экипажей советских орбитальных станций «Салют-4» (в северном полушарии) и «Салют-6» (в южном полушарии).

На «Салюте-4» космонавты П. И. Климук и В. И. Севастьянов наблюдали серебристые облака визуально на

многих витках с 1 по 17 июля 1975 г. Весьма показательна в отношении глобального расположения серебристых облаков по космическим и наземным наблюдениям ночь 3—4 июля 1975 г., когда наши космонавты наблюдали серебристые облака на протяжении девяти витков, на тех их участках, которые пролегали над средними широтами Атлантики, Западной Европы, территории СССР от его западных до восточных границ и части Тихого океана до берегов Америки (рис. 22). На рис. 22 черными кружками

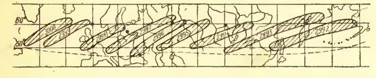


Рис. 22. Области, над которыми наблюдались серебристые облака с «Салюта-4» 3—4 июля 1975 г. Черные кружки обозначают места их наземных наблюдений.

показаны также места расположения серебристых облаков по наземным наблюдениям в ту же ночь. Рисунок наглядно иллюстрирует возможности наблюдений из космоса для регистрации глобального расположения серебристых облаков. Согласно наземным наблюдениям, эти облака были довольно яркими, их оптическая толщина заключалась в пределах $10^{-5} \div 10^{-4}$.

Учитывая успех визуальных наблюдений с «Салюта-4», в задачу первого же экипажа «Салюта-6» (Ю. В. Романенко, Г. М. Гречко), работавшего с декабря 1977 г. по март 1978 г., было поставлено фотографирование серебристых облаков из космоса. Поскольку период работы экипажа приходился на зиму в северном полушарии и лето в южном, фотографирование серебристых облаков производилось над южным полушарием Земли. Всего было получено 40 черно-белых и 5 цветных фотографий серебристых облаков. Одна из черно-белых фотографий, полученная 15 января 1978 г., представлена на рис. 23. Солнце недавно зашло. Мы видим еще яркий сегмент зари, а над ним — тонкую полоску серебристых облаков, которая при внимательном рассматривании разделяется на две. Впрочем, некоторые признаки структуры серебристых облаков видны и ниже полосы, в верхней части сегмента зари.

Всего серебристые облака наблюдались первым экипажем «Салюта-6» на 146 витках с 23 декабря 1977 г. по 2 февраля 1978 г., в течение 31 ночи. Замечательно, что с

24 декабря по 5 января серебристые облака наблюдались непрерывно, на всех витках, разумеется, на соответствующих широтах. 6 января они внезапно исчезли, но 8 января появились вновь, в форме слабой вуали (флера). Активные периоды видимости серебристых облаков были отмечены также с 14 по 16 января и с 27 января по 2 февраля 1978 г.

Серебристые облака наблюдались обычно не выше 2° над горизонтом, как при положении Солнца под горизонтом, так и над ним, на небольшой высоте (в космосе нет нашего светлого фона неба, освещен бывает лишь небольшой



Рис. 23. Фотография серебристых облаков из космоса с орбитальной станции «Салют-6» 15 января 1978 г.

сегмент вблизи горизонта, см. рис. 23). По мере приближения орбитальной станции к серебристым облакам последние заметно поднимаются над горизонтом и приобретают хорошо выраженную волновую структуру. Но дальше, хотя их яркость возрастает, структура начинает пропадать, и облака превращаются в тонкую яркую полосу. Это происходит потому, что с орбитальной станции они видны как бы в разрезе.

Рассмотрим геометрию наблюдения серебристых облаков с орбитальной станции (рис. 24). Пусть орбитальная станция движется на высоте $H_1 > H$, где H — высота серебристого облака C, и приближается к нему со стороны ночной полусферы Земли. Облако взойдет над горизонтом станции, когда она находится в точке S_1; положение ее определяется центральным углом ψ_1, который можно найти по формуле (7), подставив в нее H_1 вместо H. Положим для дальнейших расчетов $H_1 = 350$ км. Рефракцией для простоты пренебрегаем. Тогда найдем $\psi_1 = 18°$. Угол $BOC = \psi = 9°09'$,

а расстояние $S_1C=R$ (tg ψ+tg ψ_1)=3200 км. Именно с такого расстояния космонавты, находящиеся на орбитальной станции, могут заметить у горизонта серебристые облака. Расстояние от космического наблюдателя до видимого горизонта станции «Салют» $SB=R$ tg $\psi_1\approx2000$ км.

Рис. 24. Геометрия видимости серебристых облаков с орбитальной станции.

Рассмотрим теперь другое положение станции S_2, когда серебристое облако видно «в разрезе». Для этого восстановим в точке C перпендикуляр к радиусу-вектору облака OC до его пересечения с орбитой станции S_1S_2. Центральный угол ψ_2 найдем теперь из формулы (10), заменив в ней H_0 на H и H на H_1. Получим $\psi_2=16°$. А теперь найдем угол DS_2C, равный угловой высоте h_C серебристых облаков над линией горизонта станции S_2D в этот момент. Нетрудно сообразить, что

$$h_C=\psi_1-\psi_2,$$

поскольку $\angle DOS_2=\angle BOS_1=\psi_1$, а $\angle DS_2C=\angle CS_2O-\angle DS_2O=(90°-\psi_2)-(90°-\psi_1)=\psi_1-\psi_2$. Следовательно, $h_C=2°$, как и получилось у наших космонавтов. Величина этого угла подтверждает, что облака находились именно на высоте около 80 км (для другой высоты и угол получился бы другой).

Нетрудно также подсчитать, что в положении S_2 расстояние «станция — облако» $S_2C=1880$ км. Дальнейшее приближение станции к облаку приведет к тому, что облако окажется на фоне освещенной Солнцем полусферы Земли (а еще раньше — нижних слоев атмосферы) и пропадет, что и наблюдалось в действительности.

На станции «Салют-6» не раз отмечались случаи, когда поле серебристых облаков простиралось на весь южный горизонт (не забудем, что наблюдения велись в южном полушарии Земли) и наблюдалось в течение 7—8 последовательных витков. Это показывает, что серебристые облака порой полностью покрывали «разрешенную» для них широтную зону, что ранее было отмечено со станции «Салют-4» для северного полушария (см. рис. 22). По предварительным данным, в южном полушарии серебристые облака появляются на широтах выше 53° S.

Космические наблюдения позволили выявить средние (20÷100 км) и длинные (100÷280 км) волны в структуре серебристых облаков. Труднее оказалось обнаружить короткие волны (3÷12 км), что связано с геометрическими условиями наблюдения, описанными выше. Зато надежно подтверждена многослойность полей серебристых облаков, ранее установленная по наземным наблюдениям.

Фотографии серебристых облаков, полученные экипажем «Салюта-6», подверглись на Земле фотометрической обработке, которую провели сотрудники Института астрофизики и физики атмосферы Академии наук ЭССР О. А. Авасте и Ч. И. Виллманн при участии космонавтов-исследователей Г. М. Гречко и Ю. В. Романенко. Были построены фотометрические профили облаков для различных азимутов, которые еще четче, чем просмотр негативов, показали волновую структуру облачного поля. Исследователи сравнили изменение яркости серебристых облаков вдоль азимута с теоретической моделью рассеяния света частицами облаков, построенной в 1975 г. Ч. И. Виллманном. Вблизи азимута Солнца яркость серебристых облаков оказалась примерно вдвое выше, чем предсказывала модель, что авторы работы объяснили присутствием в наблюдавшихся 15 января 1978 г. с «Салюта-6» серебристых облаках более крупных частиц, чем принятые в теоретической модели (т. е. больше 0,1 мкм).

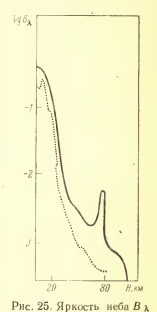


Рис. 25. Яркость неба B_λ на волне 1,9 мкм по результатам сканирования с «Салюта-4» при наличии серебристых облаков (сплошная линия) и при их отсутствии (пунктир).

Для орбитальной станции «Салют-4» группой советских ученых был сконструирован четырехканальный радиометр, работающий в ближнем инфракрасном диапазоне, на длинах волн 1,35; 1,9; 2,2 и 2,7 мкм. С его помощью с борта орбитальной станции в июне — июле 1975 г. производилась последовательная регистрация яркости неба (сканирование) в вертикале Солнца. На рис. 25 показаны результаты сканирования на волне 1,9 мкм в присутствии серебристых

облаков (сплошная линия) и в их отсутствие (пунктир). Четко заметен резкий максимум на высоте 80 км, когда серебристые облака наблюдались. Всего было сделано около 20 сканов.

По результатам этих наблюдений удалось построить спектральное распределение свечения серебристых облаков в инфракрасной области (рис. 26). На график нанесены

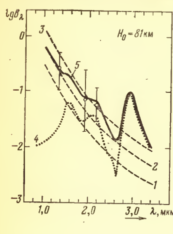


Рис. 26. Спектральное распределение яркости B_λ серебристых облаков: *1—3* — теоретические кривые при $\tau=10^{-5}$, $3\cdot10^{-5}$ и 10^{-4} соответственно, *4* — эмиссия ОН (по Н. Н. Шефову), *5* — сумма яркости серебристых облаков при $\tau=3\cdot10^{-5}$ и ОН, белыми кружками показаны данные наблюдений с «Салюта-4» (по О. А. Авасте и др.).

теоретические кривые для значений оптической толщины облаков 10^{-5}, $3\cdot10^{-5}$ и 10^{-4}(*1—3*), а также спектральная кривая *4* излучения гидроксила (ОН), максимум которого, согласно Н. Н. Шефову, также приходится на высоту 80 км (этот факт мы еще рассмотрим в дальнейшем). Сумма излучения гидроксила и серебристых облаков при $\tau=3\cdot10^{-5}$ изображена кривой 5. Измерения на трех длинах волн показаны точками. Вертикальные отрезки обозначают вариации яркости от одного измерения к другому. Заметно хорошее согласие теоретических и экспериментальных результатов. К сожалению, измерения на волне 2,7 мкм использовать не удалось.

Разумеется, описанные выше результаты — только начало исследования серебристых облаков из космоса. Эти исследования продолжаются. Они проводились на орбитальной станции «Салют-7», в частности, экипажем посещения в составе Л. И. Попова, А. А. Сереброва и С. Е. Савицкой в августе 1982 г. Результаты этих исследований, несомненно, вскоре принесут свои обильные плоды.

§ 7. ПРИРОДА СЕРЕБРИСТЫХ ОБЛАКОВ

Как уже говорилось в § 1, первые предположения о природе серебристых облаков связывались с извержением вулкана Кракатау 27 августа 1883 г. Громадное количество вулканической пыли, выброшенной в атмосферу при этом катастрофическом извержении (по оценкам ученых, около 35 миллионов тонн), могло образовать и такие облака. Но от извержения Кракатау до первого появления серебристых облаков в июне 1885 г. прошло почти два года, а главное,— после других катастрофических извержений вулканов (Мон-Пеле, 1902 г.; Катмаи, 1912 г.; Квицопу, 1932 г.) серебристые облака не наблюдались.

Спустя полвека, уже в 20-е годы нашего столетия, известный исследователь метеоритов Л. А. Кулик выдвинул метеорно-метеоритную гипотезу образования серебристых облаков. Яркие серебристые облака, наблюдавшиеся в течение нескольких ночей подряд сразу после падения знаменитого Тунгусского метеорита, навели ученого на мысль, что это совпадение неслучайно, и частицы серебристых облаков — это мельчайшие осколки метеорита, образовавшиеся при его дроблении в атмосфере, а также взметенные вверх в результате взрыва при ударе метеорита (как тогда полагали) о Землю. Позже Л. А. Кулик пришел к выводу, что не только гигантские метеориты, но и обычные метеоры, дробясь и испаряясь в атмосфере, порождают частички метеорной пыли, которые мы и наблюдаем в виде серебристых облаков. Этим Л. А. Кулик стремился объяснить случаи появления серебристых облаков в годы, когда падения метеоритов не наблюдались.

Метеорная гипотеза пользовалась большой популярностью в течение почти 30 лет — до середины 50-х годов, когда она была вынуждена сойти со сцены, потому что не могла дать ответ на целый ряд вопросов, относившихся к условиям появления и структуре серебристых облаков:

1) Почему они появляются в узком интервале высот с устойчивым средним значением 82—83 км?

2) Почему они наблюдаются только летом и только в средних широтах?

3) Почему они имеют характерную тонкую структуру, очень похожую на структуру перистых облаков?

Ответ на эти три вопроса дала конденсационная (ледяная) гипотеза, не раз высказывавшаяся разными лицами в разные годы, но получившая серьезное количественное обоснование лишь в 1952 г. в работе И. А. Хвостикова.

Ход рассуждений И. А. Хвостикова был примерно таков. По внешнему виду серебристые облака очень похожи на перистые, которые, как хорошо известно, состоят из кристалликов льда. Значит, и для серебристых облаков можно предположить такое же строение. Но для того чтобы водяной пар в атмосфере мог конденсироваться в лед, нужны определенные условия. Именно, парциальное давление водяного пара p_{H_2O} в атмосфере должно превосходить упругость насыщенного пара над льдом при данной температуре $E\ (T)$. Между тем

$$p_{H_2O} = qP, \qquad (17)$$

где q — удельная концентрация водяного пара (отношение его концентрации к плотности воздуха), P — давление атмосферы на данной высоте. Упругость насыщенного пара

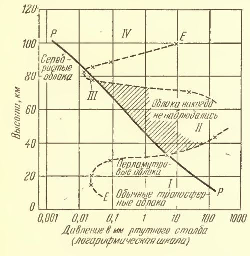


Рис. 27. Диаграмма И. А. Хвостикова (1952 г.).

резко падает с понижением температуры. Таким образом, необходимое и достаточное условие для конденсации водяного пара в кристаллики льда, согласно И. А. Хвостикову, выглядит так:

$$E\ (T). \qquad (18)$$

И. А. Хвостиков построил по известным тогда данным о строении верхних слоев атмосферы кривые изменения давления P и упругости насыщенного пара E с высотой. Получилась такая картина (рис. 27).

Вся атмосфера делится по высоте на четыре области:

область *I* (от поверхности до высоты 30 км), где $P>E$ и наблюдаются обычные тропосферные, а также перламутровые облака, появляющиеся иногда на высотах $22 \div 30$ км;

область *II* между высотами $30 \div 75$ км, где $P<E$ и никакие облака никогда не наблюдались;

узкая область *III* в интервале высот $75 \div 85$ км, где и наблюдаются серебристые облака и где снова выполняется условие $P>E$;

область *IV* выше 85 км, где опять становится $P<E$ и облака не наблюдаются.

Работа И. А. Хвостикова произвела большое впечатление, но и вызвала сильную критику со стороны приверженцев метеорной гипотезы происхождения серебристых облаков. Они указывали, в частности, что в области *III* условие $P>E$ хотя и выполняется, но держится буквально «на волоске»: стоит температуре в мезопаузе немного повыситься, и условие $P>E$ выполняться не будет. Кроме того, условие $P>E$ — необходимое, но недостаточное для конденсации водяного пара; достаточным является условие (18), а величина q — малое число. Иначе говоря, если даже общее давление воздуха будет больше упругости насыщенного пара, парциальное давление водяного пара может оказаться недостаточным, чтобы процесс конденсации имел место.

В то время данных о температуре мезопаузы было очень мало. В 30-е годы господствовало представление о довольно высоких температурах в этой области тмосферы — около 300 К и более. Температуру определяли косвенными методами: по скорости распространения звука от сильных взрывов, по торможению метеоров и т. д. Запуски ракет с приборами в верхние слои атмосферы в конце 40-х — начале 50-х годов значительно изменили наши сведения о температуре мезопаузы в сторону ее существенного понижения. Так, в «экспериментальной схеме атмосферы» Национального совещательного комитета по аэронавтике США (NACA), опубликованной в начале 1947 г., минимальная температура мезопаузы была определена в 240 К. Но уже полет исследовательской ракеты 7 марта 1947 г. дал минимальную температуру 200 К, а обработка наблюдений распространения звуковых волн от сильного взрыва на о. Гельголанд 18 апреля 1947 г. дала $T_{\min}=173$ К. В 1953—1954 гг. были опубликованы средние кривые распределения температуры, дававшие $T_{\min}=190 \div 195$ К.

Но вскоре стало ясно, что в мезопаузе могут наблюдаться и гораздо более низкие температуры. В 1957 г. были

опубликованы результаты большой серии советских ракетных экспериментов, проводившихся под руководством В. В. Михневич в европейской части СССР с июня по сентябрь, т. е. в тот сезон и на тех широтах, когда и где наблюдаются серебристые облака. Был зарегистрирован четкий минимум температуры на высоте 80—85 км с $T_{min} = 154$ K. Годом позже бельгийский аэролог М. Николе на основании анализа поглощения рентгеновских лучей на больших высотах получил $T_{min}=150$ K. Наконец, запуски ракет, проведенные в летний период 1958 г. Морской исследовательской лабораторией США в форте Черчилль (широта около 59°), показали $T_{min}=165$ K.

Сопоставление всех этих результатов с более высокими значениями температуры мезопаузы, полученными ранее американскими учеными по запускам ракет с полигона Уайт Сэндс (широта 33°), позволило автору этой книги в августе 1958 г. предложить объяснение сезонного и широтного эффектов появлений серебристых облаков тем, что именно на средних широтах в летнее время года в мезопаузе происходит понижение температуры до крайне низких значений 150÷165 K.

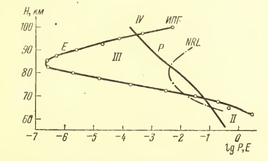


Рис. 28. Распределение давления P (в миллиметрах) и упругости насыщенного пара E по данным Института прикладной геофизики АН СССР (ИПГ) и Морской исследовательской лаборатории США (NRL).

Новая диаграмма (рис. 28) типа построенной в 1952 г. И. А. Хвостиковым показывала теперь уже гораздо более широкий и длинный «язык» в области III в мезопаузе, обеспечивающий выполнение условия (18) даже при очень малых значениях q, а значит, и возможность формирования в этой области серебристых облаков.

Но нужно было еще дать ответ на прямой вопрос: существует ли на столь большой высоте водяной пар в коли-

честве, достаточном для образования серебристых облаков? Иначе говоря, не слишком ли мало́ значение q?

Серия измерений концентраций водяного пара в стратосфере, на высотах от 16 до 40 км, проведенных разными авторами в 1949—1962 гг., давала максимальные значения $q=3\cdot10^{-4}$, хотя некоторые измерения показывали значения, в 10—15 раз меньшие. Но если водяной пар проникает в верхние слои атмосферы из нижних слоев, то казалось, что на высоте 80 км q должно быть еще меньше.

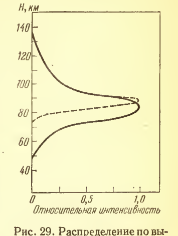


Рис. 29. Распределение по высоте эмиссии гидроксила (по данным NRL). Сплошная линия — полоса 7820 Å, прерывистая линия — область 7600—10 400 Å.

Однако еще в 50-е годы обнаружился факт, косвенно свидетельствовавший о наличии на высотах 80—90 км какого-то максимума содержания паров воды. Это было свечение гидроксила OH, открытое в 1950 г. независимо советскими учеными И. С. Шкловским и В. И. Красовским и американским ученым А. Мейнелом.

В 1955 г. Морская исследовательская лаборатория США организовала серию запусков ракет со спектрографами для изучения спектров свечения неба на разных высотах. По результатам изучения полученных спектров удалось построить график распределения излучения гидроксила OH по высоте (рис. 29). Этот график показал четкий максимум на высотах 80÷88 км, т. е. как раз в зоне образования серебристых облаков.

Но гидроксил может образовываться за счет фотодиссоциации водяного пара под действием ультрафиолетовых лучей в континууме Шумана — Рунге (см. § 2). Другим продуктом фотодиссоциации молекул H_2O является атомарный водород, который, в свою очередь, соединяясь с молекулами кислорода или озона, может образовывать возбужденные молекулы гидроксила.

В 1966 г. советский геофизик Н. Н. Шефов установил прямую зависимость между интенсивностью полос излучения гидроксила и появлениями серебристых облаков.

В 1964—1965 гг. в Центральной аэрологической обсерватории (СССР) были впервые организованы прямые ракетные измерения концентрации водяного пара в интервале высот 70÷90 км. Приборы были сконструированы так, что всякая возможность загрязнения посторонними примесями или заноса водяного пара снизу исключалась. Результаты, опубликованные А. В. Федынским и С. П. Перовым в 1967—1968 гг., превзошли все ожидания: величина q достигала на высотах 75÷80 км четкого максимума, заключенного между 10^{-2} и 10^{-3}. Эти результаты были вскоре подтверждены другими методами Г. М. Мартынкевичем и его сотрудниками.

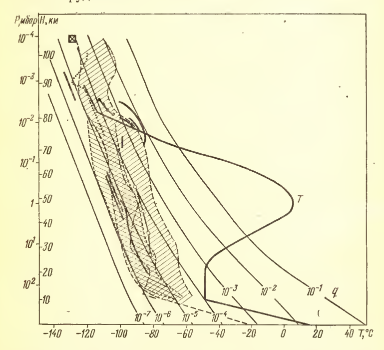


Рис. 30. Распределение концентрации H_2O по высоте по данным Д. Зоннтага, А. В. Федынского, С. П. Перова и других исследователей. Значения q надписаны у кривых. Здесь же нанесена кривая температуры (T).

В 1974 г. немецкий ученый Д. Зоннтаг собрал все данные по концентрации водяного пара в атмосфере до высот 100 км. Его результаты показаны на рис. 30 широкой заштрихованной полосой. Можно видеть, что величина q на больших высотах р а с т е т (изолинии равных q нане-

сены на график), достигая на высоте 75 км примерно $4 \cdot 10^{-3}$. Здесь же нанесены результаты А. В. Федынского и С. П. Перова и некоторых других исследователей.

Расхождения между результатами разных исследователей побудили А. В. Федынского изучить вопрос о зависимости величины q от сезона и широты места, с которыми, как мы знаем, тесно связано формирование серебристых облаков. Результаты показали отчетливый максимум q в июле — августе и минимум в январе — феврале (в северном полушарии). Влажность в мезопаузе в средних широтах всегда больше, чем над тропической зоной. Над средними широтами влажность растет с высотой, начиная от высот 25÷30 км.

Таким образом, важный факт повышения влажности (т. е. величины q) в те сезоны, над теми широтами и на том уровне, где образуются серебристые облака, был надежно установлен. Но нужно было еще дать объяснение этому факту. В 60-е годы было предложено два объяснения этого явления.

Одно из них, более простое, состоит в том, что выше 25—30 км на средних широтах в летнее время года наблюдаются восходящие токи воздуха, которые переносят водяной пар в область мезопаузы, где он и вымерзает, образуя серебристые облака. Недостаток H_2O компенсируется новым притоком пара снизу, и процесс продолжается. На других широтах и в другие сезоны восходящие токи либо не возникают, либо подавляются отсутствием вымораживания (температуры для которого слишком высоки). Исследование И. А. Хвостикова и И. М. Кравченко, выполненное в 1967 г., показало, что при скорости восходящих токов 1 см/с удельная влажность выше 70 км будет значительно больше, чем при их отсутствии. Учет вымерзания водяного пара позволяет объяснить не только поддержание, но и рост влажности с высотой.

Другое объяснение — более интересное. Оно состоит в том, что водяной пар на больших высотах образуется при взаимодействии атомов водорода, летящих к Земле от Солнца, с атомами кислорода верхних слоев земной атмосферы. Эта идея, впервые высказанная в 1933 г. норвежским геофизиком Л. Вегардом и поддержанная в 1952 г. И. А. Хвостиковым, получила количественное обоснование в 1961 г. в работе французского ученого К. де Турвиля.

Де Турвиль подсчитал количество водорода, которое захватывается магнитосферой Земли (в составе солнечного ветра летят не нейтральные атомы, а ионы водорода — про-

тоны). Этот процесс захвата называется *аккрецией*. Расчеты де Турвиля привели к оценке скорости аккреции на всю Землю $1{,}7\cdot10^6$ г/с. Но анализ этого вопроса, проведенный в 1966 г. И. А. Хвостиковым, показал, что оценка де Турвиля завышена в 100, а то и в 1000 раз, так что более реальный уровень притока водорода на всю Землю составляет $1{,}5\cdot10^3\div1{,}5\cdot10^4$ г/с, а на единицу поверхности — около $2\cdot10^{-15}$ г/см$^2\cdot$с$\approx10^9$ атомов/см$^2\cdot$с. Такой приток водорода почти в 40 раз превосходит его потерю за счет диссипации (ускользания) из верхних слоев атмосферы. Куда же девается остальная часть атомов водорода? Очевидно, они вступают в химические реакции с атомами атмосферы. Две из них, а именно,

$$H + H + M \rightarrow H_2 + M + 431 \text{ Дж}, \qquad (19)$$

$$H_2 + O + M \rightarrow H_2O + M, \qquad (20)$$

приводят к образованию молекул H_2O. В приведенных формулах M означает любой атмосферный атом, столкновение с которым ускоряет реакцию; 431 Дж — выход энергии в первой реакции, которая является, таким образом, экзотермической.

Весь этот механизм получил, по предложению американского исследователя Б. Хаурвица, название «солнечный дождь».

Способен ли «солнечный дождь» обеспечить повышенную влажность мезопаузы? Примем необходимое для образования серебристых облаков значение $q=10^{-3}$. Тогда количество осажденной воды над уровнем 70 км составит столбик всего 1 мкм, масса которого (при площади 1 см^2) будет равна 10^{-4} г/см^2. Из этой массы 8/9 поставляет атмосферный кислород, которого вполне достаточно. На долю солнечного водорода остается 10^{-5} г/см^2. Такое количество солнечный ветер принесет за $5\cdot10^9$ с$=150$ лет, что, конечно, многовато. Поэтому гипотеза «солнечного дождя», несмотря на всю ее привлекательность, вряд ли может объяснить повышенную влажность мезопаузы, если приведенные выше оценки аккреции водорода из солнечного ветра не будут существенно пересмотрены в сторону их увеличения хотя бы до значений, принятых де Турвилем.

Основным механизмом, регулирующим влажность в области мезопаузы, по-видимому, следует считать систему восходящих токов в стратосфере.

Но нужно было решить еще один вопрос, который противники конденсационной гипотезы считали (в конце 50-х годов) чуть ли не камнем преткновения для ее обоснования.

Речь идет о тепловом режиме частиц серебристых облаков, в частности,— ледяных кристалликов. По мнению американских ученых Е. Вестина и Д. Дейрменджяна, солнечные лучи и тепло Земли должны были заставлять кристаллики льда испаряться, так что они не могли быть устойчивыми.

В 1961 г. автор этой книги подверг критике метод расчета Вестина и Дейрменджяна, показав, что они получили завышенные значения средней температуры льда в мезопаузе. В 1970 г. он же выполнил более строгое рассмотрение этого вопроса. В самом деле, составим уравнение лучистого равновесия ледяной частицы. Источниками ее нагрева, вообще говоря, могут быть:

1) излучение Солнца в непрерывном спектре $Q_{\odot}$,

2) излучение Солнца в линиях $Q_{УФ}$,

3) корпускулярное излучение Солнца $Q_{кор}$,

4) длинноволновое излучение Земли и нижних слоев атмосферы $Q_{\oplus}$,

5) тепло, выделяющееся при рекомбинации кислорода на частице, $Q_{рек}$.

Частица в свою очередь отдает тепло окружающей среде путем излучения ($Q_{изл}$) и теплопроводности —при столкновениях с атомами и молекулами воздуха ($Q_{т}$). Следовательно, наше уравнение должно иметь вид

$$Q_{\odot}+Q_{УФ}+Q_{кор}+Q_{\oplus}+Q_{рек}=Q_{изл}+Q_{т}. \qquad (21)$$

Автор оценил все слагаемые в левой части. Оказалось, что $Q_{УФ}$ и $Q_{кор}$ никогда не превышают 10 эрг/см²·с, $Q_{рек}=4\cdot10^3$ эрг/см²·с, $Q_{\odot}=1{,}7\cdot10^4$ эрг/см²·с, $Q_{\oplus}=2\cdot10^5$ эрг/см²·с.

Таким образом, главной составляющей притока тепла для кристаллика льда является не солнечное излучение, а длинноволновое излучение Земли. Причина этого заключается в том, что мелкие кристаллики льда (<1 мкм) практически прозрачны для видимых лучей. Основной вклад в их нагрев лучами Солнца создает длинноволновый «хвост» солнечного излучения на волнах 2÷13 мкм. Но излучение Земли на этих же волнах более интенсивно, чем солнечное,— на целый порядок. Таким образом, общее тепло, поглощаемое ледяной частицей, составляет $2{,}2\cdot10^5$ эрг/см²·с.

Как же частица теряет тепло? Отдача тепла излучением зависит в основном от температуры частицы и равна

$$Q_{изл}=4\varepsilon\sigma T^4, \qquad (22)$$

где ε — коэффициент излучения, σ — постоянная Стефана — Больцмана, множитель 4 означает, что частица излучает со всей поверхности, равной для шара $4\pi r^2$, тогда как все притоки тепла мы рассчитывали на поверхность его миделя (πr^2). Отдача тепла теплопроводностью зависит от разности температур частицы и окружающей среды. Приняв последнюю равной 160 К и вычисляя $Q_{изл}$ и $Q_т$, можно найти, при какой температуре частицы их сумма станет равной притоку тепла, найденному выше. Эта температура оказалась равной 170 К на высоте 80 км и 178 К на высоте 90 км. Оба эти значения лежат ниже точки инея водяного пара (192 К); иначе говоря, ледяные частицы в этих условиях испаряться не должны.

Так работами советских ученых за два десятилетия была обоснована конденсационная гипотеза происхождения серебристых облаков.

Оставалось выяснить, какие частицы служат ядрами конденсации, и... поймать эти частицы, рассмотреть их в лаборатории. Несмотря на все трудности, и эти задачи были успешно решены.

§ 8. ЯДРА КОНДЕНСАЦИИ: ТЕОРИЯ И ЭКСПЕРИМЕНТЫ

Как хорошо известно, конденсация водяного пара в капельки тропосферных облаков обычно не происходит сама собой — необходимы так называемые ядра конденсации. Причина этого состоит в том, что давление пара, требуемое для конденсации в очень маленькую капельку, может в несколько раз превышать давление насыщенного пара над плоской поверхностью. Только при перенасыщении в пять и более раз может начаться спонтанная конденсация и в совершенно чистом воздухе (без ядер). Ядра конденсации, каковыми обычно являются мельчайшие пылинки или кристаллики морской соли, имеют уже достаточные размеры, чтобы конденсация на них происходила.

Ядра конденсации принято делить на ядра Айткена (0,005÷0,1 мкм), тяжелые (0,1÷1 мкм) и сверхтяжелые (1÷20 мкм). Ядра Айткена, хотя и самые многочисленные (в приземном слое воздуха их тысячи на кубический сантиметр), из-за своих малых размеров не играют существенной роли как ядра конденсации в обычных тропосферных облаках. Основную роль играют тяжелые ядра, имеющие как природное, так и промышленное происхождение. Сверхтяжелые ядра, состоящие в основном из кристалликов

морской соли, играют роль при образовании капель облаков в морских районах.

Какие же частицы служат ядрами конденсации при образовании серебристых облаков? В разное время по этому вопросу высказывались самые различные предположения: частицы вулканической пыли, кристаллики морской соли, наконец, метеорные частицы. Гипотеза о том, что именно метеорные частицы служат ядрами конденсации при образовании серебристых облаков, была впервые высказана в 1926 г. Л. А. Куликом, но осталась незамеченной на фоне его же гипотезы о чисто метеорном происхождении этих облаков. В 1950 г. ее вновь независимо выдвинул автор этой книги (работа Л. А. Кулика нам тогда не была известна), и с тех пор эта точка зрения нашла поддержку почти у всех исследователей серебристых облаков.

В самом деле, разрушение метеорных тел, проникающих в земную атмосферу и наблюдаемых в виде метеоров, происходит в основном как раз над мезопаузой, на высотах $120 \div 80$ км. Те тела, которые создают на небе привычное нам явление метеора, имеют массу от нескольких граммов до 10^{-6} г; более слабым метеорам, наблюдаемым в бинокль или телескоп, соответствуют массы от 10^{-6} до 10^{-9} г; еще более слабым, регистрируемым с помощью радиолокации, — до 10^{-12} г. Еще меньшие тела тормозятся в атмосфере, до того как разогреются настолько, чтобы началось их испарение *). Такие тела называются *микрометеоритами*. По размерам они соответствуют тяжелым и сверхтяжелым ядрам конденсации.

Но кроме микрометеоритов, поставщиками ядер конденсации могут быть и более крупные метеорные тела, поскольку они дробятся в атмосфере. Одной из форм их дробления является так называемое шелушение, когда с поверхности летящего тела откалываются мельчайшие осколки («щепки»). Кроме того, происходит плавление самого метеороида (метеорного тела), причем расплавленная пленка сдувается с него набегающим потоком воздуха в виде капель. Застывая, они превращаются в шарики, которые затем выпадают на Землю и попадают в руки ученых **). Много таких шариков выпадает вслед за падением крупных

*) Напомним, что свечение метеора в основном обусловлено излучением п а р о в метеорного тела (только примерно 3% этого свечения составляет излучение газов воздуха).

**) Аналогичные по виду шарики могут образоваться и в результате промышленного производства (металлургия, сварка и т. д.). Их отличают от космических шариков по составу и другим признакам.

метеоритов (рис. 31). Мельчайшие из них тоже могут служить ядрами конденсации для серебристых облаков.

Исследования притока метеорного вещества на Землю показывают, что общий суточный приход его на весь земной шар составляет около 100 т/сутки, причем поток частиц с массой 10^{-13} г ($r \sim 0{,}2$ мкм), пригодных в качестве ядер



Рис. 31. Метеоритные шарики (Сихотэ-Алинский железный метеори , по Е. Л. Кринову).

конденсации, составляет около 10^{-2} частицы/см^2·с, или 10^3 частиц/см^2·сутки. Этого количества вполне достаточно, чтобы обеспечить образование серебристых облаков.

Еще в 30-е годы делались попытки найти связь между появлением серебристых облаков и интенсивностью метеорных потоков. Но, во-первых, многие метеорные потоки действуют в периоды, неблагоприятные для образования серебристых облаков. А, во-вторых, вклад метеорных потоков в общий приток метеорного вещества на Землю весьма скромен и не превосходит 1% от фона спорадических метеоров. Значительно больше дают метеорные дожди, но это — явление весьма редкое, и за последние два столетия они наблюдались в даты, когда серебристые облака образоваться не могли из-за неблагоприятных условий в мезопаузе.

Все же некоторые авторы (например, чехословацкий астроном З. Квиз) высказывали мнение, что метеоры потоков, будучи продуктами распада комет и имея довольно рыхлую структуру, уже содержащую льды кометного происхождения, являются более подходящими ядрами конденсации, чем прочие метеоры. Автор этой книги высказал предположение, что метеоры потоков, обладая большей скоростью, чем спорадические метеоры, сильнее дробятся, порождая «щепки», могущие служить ядрами конденсации. Однако эти предположения пока не получили подтверждения.

Имеются и другие гипотезы о природе ядер конденсации. Так, Г. М. Мартынкевич высказал мнение, что эту роль могли бы играть кластеры (объединения) ионов. Такая возможность не исключена.

Конечно, многое о природе частиц серебристых облаков и их ядер конденсации можно было бы узнать, захватив эти частицы непосредственно в атмосфере с помощью при-

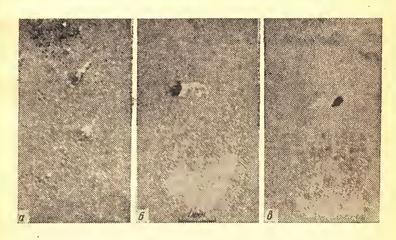
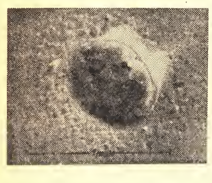


Рис. 32. Частицы, обнаруженные на поверхностях коллекторов в ходе американо-шведского эксперимента 1962 г.: *а* — частицы, окруженные гало, собранные в поле серебристых облаков, *б* — частица без гало, *в* — частица загрязнения, попавшая на поверхность до эксперимента.

боров, установленных на ракетах, и изучив их в лаборатории. Такие попытки делались неоднократно, начиная с 1962 г., и небезуспешно. Так, в 1962 г. в Швеции был осуществлен совместный американо-шведский эксперимент. По сигналу со станции наблюдений, расположенной в

200 км южнее ракетного полигона, в момент прохождения над полигоном ярких серебристых облаков в них была запущена ракета, снабженная специальными ловушками нескольких систем. Это было 11 августа, а 7 августа был произведен контрольный пуск при отсутствии серебристых облаков.

Результаты оказались весьма интересными. Для исключения загрязнения посторонними частицами до и после пуска приемная поверхность ловушки опылялась пологой струей порошка окиси алюминия. Таким образом, частицы, осевшие на поверхности ловушки до пуска, имеют два «хвоста» оттенения (опыление производилось с двух разных сторон), частицы, захваченные во время самого эксперимента, — один «хвост» (рис. 32), а осевшие позже — ни одного.


Рис. 33. Одна из наиболее крупных частиц, обнаруженных в американо-шведском эксперименте 1962 г. Заметно окружающее ее гало.

Во время пуска 11 августа 1962 г. было захвачено множество частиц, окруженных своеобразным «гало» — остатками растаявшей массы, по-видимому, льда (рис. 33). Сами частицы имели размеры от 0,02 до 1 мкм. Во время контрольного пуска 7 августа частиц было существенно меньше и «гало» вокруг них не наблюдались. В последующие годы шведские исследователи во главе с Г. Виттом и американские ученые, возглавляемые К. Хеменуэем, провели еще несколько подобных экспериментов. В захваченных частицах были обнаружены железо и никель (типичные для метеорных частиц). Галоподобные структуры были обнаружены не раз, но уточнить состав летучих компонент в них не удалось из-за трудностей работы со столь малыми частицами.

Таким образом, гипотеза автора о роли метеорных частиц как ядер конденсации для образования серебристых облаков, высказанная еще в 1950 г., получила убедительное подтверждение. Фотометрические замеры, выполненные Г. Виттом с помощью приборов, установленных на ракетах, ясно показали рост рассеяния излучения при попадании

ракеты в серебристые облака. Позднее американский геофизик Т. Донахью и его сотрудники обнаружили преобладание аэрозольного слоя на высотах около 80 км в высоких широтах северного полушария Земли.

Все эти исследования дают довольно четкую картину формирования и природы серебристых облаков. Конечно, не все еще изучено, но будущие исследования, несомненно, прольют свет на вопросы, оставшиеся неясными или сомнительными. Среди таких вопросов — возможность формирования серебристых облаков не путем конденсации на ядре, а за счет коагуляции (объединения) мельчайших частичек размером порядка 0,01 мкм, вопрос о роли ионных кластеров и некоторые другие.

§.9. СЕРЕБРИСТЫЕ ОБЛАКА НА ДРУГИХ ПЛАНЕТАХ

Мы убедились, что серебристые облака, состоящие в основном из кристалликов льда, образуются в верхних слоях земной атмосферы при наличии необходимых и достаточных условий для конденсации водяного пара в льдинки.

Но только ли в земной атмосфере могут образовываться такие облака? Не создаются ли подходящие условия для их образования в атмосферах других планет? А если да, то в каких именно?

Водяной пар отсутствует в атмосферах планет-гигантов. Планета Меркурий вовсе лишена атмосферы. Остаются Венера и Марс.

Наблюдения давно уже показывали, что в атмосфере Марса плавают облака. Эти облака были двух типов: желтые облака, состоящие, очевидно, из мелкой пыли, и белые и синие облака, появлявшиеся преимущественно вблизи лимба или терминатора планеты, т. е. в областях с более низкой температурой (рис. 34).

Температура и давление атмосферы Марса у поверхности планеты значительно ниже, чем у поверхности Земли. Кроме того, по ряду причин вертикальное строение атмосферы Марса отличается от строения земной атмосферы. Таких причин известно несколько.

Прежде всего, на Марсе ускорение силы тяжести составляет лишь **37%** земного. Поэтому плотность и давление атмосферы Марса убывают с высотой медленнее, чем в земной атмосфере. Это вытекает из формулы (2) § 2, поскольку шкала высот H_* обратно пропорциональна ускорению g.

С другой стороны, средняя относительная молекулярная масса μ атмосферы Марса, состоящей в основном из углекислого газа, примерно в 1,5 раза больше, чем у земной атмосферы (44 против 29), что частично компенсирует уменьшение g (в формуле (2) для H_* величина μ, как и g, стоит в знаменателе).

Далее, температура атмосферы Марса ниже, чем земной атмосферы, из-за отдаленности планеты от Солнца и слабого парникового эффекта *). Это приводит к уменьшению числителя в той же формуле.

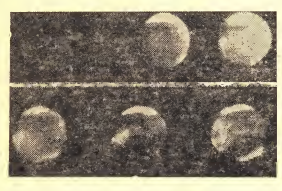


Рис. 34. «Синие» облака на Марсе вблизи терминатора (фотографии получены Э. Слайфером в 1954 г.).

По измерениям давления, плотности и температуры на разных высотах в атмосфере Марса, произведенным советскими космическими аппаратами серии «Марс», а также американскими космическими аппаратами серий «Маринер» и «Викинг», была построена модель атмосферы Марса, изображенная на рис. 35. Температура, равная у поверхности 220 К, падает затем с высотой, достигая на уровне 24 км значения 160 К. Выше простирается стратомезосфера Марса — из-за отсутствия озонного слоя и связанного с ним максимума температуры стратосфера и мезосфера на Марсе сливаются в один слой с постоянной температурой. И только выше 100 км начинается область разогрева атмосферы Марса — термосфера.

---

*) Парниковый эффект — повышение средней температуры поверхности планеты, окруженной атмосферой, благодаря поглощению части уходящего инфракрасного излучения планеты газами ее атмосферы.

Построив для атмосферы Марса диаграмму, подобную диаграмме И. А. Хвостикова для земной атмосферы (рис. 36), мы сможем убедиться в том, что ниже некоторого уровня образование ледяных облаков в атмосфере Марса невозможно, но выше этого уровня оно может происходить, если удельная концентрация водяного пара в марсианской атмосфере q достигнет необходимого минимального значения, в соответствии с табличкой:

H (км)	0	10	20	30	40	50
q	$7{,}7\cdot10^{-3}$	$6{,}2\cdot10^{-4}$	$1{,}7\cdot10^{-5}$	$4{,}9\cdot10^{-6}$	$1{,}6\cdot10^{-5}$	$5{,}0\cdot10^{-4}$

Что же говорят о присутствии водяного пара в атмосфере Марса спектроскопические измерения? Выход спектральных аппаратов за пределы земной атмосферы, до того путавшей все карты астрономов, позволил получить большую серию измерений содержания водяного пара в вертикальном слое атмосферы Марса. Эту величину принято выражать в микрометрах слоя осажденной воды. В большинстве случаев она равна 5÷20 мкм, хотя иногда (причем чаще всего над полярными шапками) увеличивается до 60÷÷80 мкм.

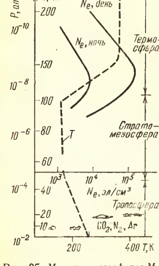


Рис. 35. Модель атмосферы Марса (по М. Я. Марову).

Рис. 36. Диаграмма И. А. Хвостикова для атмосферы Марса.

Если принять, что удельная влажность атмосферы Марса q одинакова на всех высотах (что может и не соответствовать действительности), то 10 мкм осажденного слоя будут

соответствовать $q=4\cdot10^{-4}$. Таким образом, реальные пределы $q=2\cdot10^{-4}\div3\cdot10^{-3}$. Им соответствуют нижние границы формирования ледяных облаков от 4 до 14 км.

По данным модели атмосферы Марса можно указать и верхние границы возможности образования ледяных облаков: от 58 до 74 км. Как мы сейчас убедимся, они хорошо согласуются с наблюдениями.

Нужно иметь в виду, что модель атмосферы Марса, о которой мы говорили до сих пор,— средняя для всей планеты. В более холодных местах и в зимнее время года условия для образования ледяных облаков улучшаются. Таким образом, нет никакого сомнения, что белые и синие облака, наблюдаемые на Марсе, это действительно ледяные облака, подобные перистым и серебристым облакам земной атмосферы. Вот только никакой границы по высоте мы провести между ними не можем.

Фотометрические наблюдения с космического аппарата «Марс-5» показали на высоте 30÷35 км в утренние часы наличие слоя аэрозоля, состоявшего, по-видимому, из кристалликов льда размером порядка 1 мкм и имевшего оптическую толщину около 0,1. С орбитального аппарата «Викинг-1» отмечалось несколько подобных слоев на высотах от 15 до 70 км, толщиной в несколько километров. Такие большие высоты роднят марсианские облака с нашими серебристыми облаками.

Обратимся теперь к атмосфере Венеры. Хорошо известно, что эту планету окружает плотный облачный слой, скрывающий от нас ее поверхность. Благодаря многочисленным успешным полетам наших «Венер» удалось выяснить многие свойства этого слоя. Как было выяснено еще в 1972 г. с помощью фотометра, установленного на «Венере-8», ниже 32 км атмосфера планеты почти прозрачна, от 32 до 49 км лежит слой дымки типа тумана, а между 49 и 67 км расположены три яруса облаков. Нижний и средний ярусы содержат довольно крупные частицы в 5÷8 мкм, состоящие скорее всего из кристалликов солей соляной кислоты, например, $FeCl_2$, а также из капель соляной кислоты. Верхний ярус, расположенный на высотах 58÷67 км, содержит мелкие сферические частицы размером 2÷3 мкм, по своим преломляющим свойствам напоминающие 80-процентный раствор серной кислоты. Еще выше расположена надоблачная дымка, которая простирается до высоты 80 км.

Но уже давно визуальные наблюдения и фотографии Венеры выявляли вблизи терминатора планеты яркие детали, порою выдававшиеся за терминатор. Это могли быть

только облака, расположенные выше уровня границы основного облачного слоя и освещенные Солнцем. Из чего они состоят и как образуются? Здесь наблюдательный материал гораздо беднее, чем в случае Марса, и мы пока ничего не можем сказать о природе и составе этих самых высоких облаков Венеры.

Могут ли они состоять из продуктов конденсации водяного пара, т. е. быть аналогами наших серебристых облаков? Пока мы не можем дать прямой ответ на этот вопрос. Средняя удельная концентрация водяного пара в атмосфере Венеры по различным оценкам составляет от 10^{-4} до $5 \cdot 10^{-3}$. Температура стратомезосферы Венеры не опускается ниже 200 К (на уровне верхней границы она держится между 232 и 244 К). Но отдельные похолодания верхней атмосферы Венеры вполне возможны, а это может привести к формированию облаков из кристалликов льда над основным облачным слоем. Так это или нет, покажут будущие исследования.

Мы обратили внимание читателя на возможность образования облаков типа серебристых в атмосферах других планет, чтобы подчеркнуть важность их всестороннего исследования в нашей атмосфере. Это поможет выяснить общие закономерности облакообразования при разных условиях, в атмосферах разного состава и плотности, с различной динамикой, температурным режимом и фотохимическими превращениями.

3* Зак .5

ГЛАВА II

НАБЛЮДЕНИЯ СЕРЕБРИСТЫХ ОБЛАКОВ

§ 10. ЗАДАЧИ НАБЛЮДЕНИЙ СЕРЕБРИСТЫХ ОБЛАКОВ

Наблюдения серебристых облаков несложны и доступны любому любителю астрономии. Хотя серебристые облака плавают в верхних слоях земной атмосферы и не являются, строго говоря, астрономическим объектом, внимание, уделяемое им на протяжении столетия астрономами и любителями астрономии, не случайно.

Прежде всего, серебристые облака наблюдаются на небосводе в ночные часы, когда многие любители астрономии ведут наблюдения других небесных объектов и явлений. Регистрация появления серебристых облаков может явиться как бы «побочным продуктом» этих наблюдений.

Но главное, конечно, не в этом. История науки дает нам немало фактов, показывающих, что изучение атмосфер других планет неразрывно связано с изучением нашей собственной атмосферы. Астрономические методы порой приходится применять для изучения атмосферных явлений. Целый ряд явлений в нашей атмосфере так или иначе связан с процессами, происходящими на Солнце, с метеорными явлениями и т. д.

Приведем несколько поучительных примеров. Выдающийся советский астроном академик В. Г. Фесенков (1889—1972), изучая теорию рассеяния света атмосферами планет, много своих работ посвятил оптике земной атмосферы: рассеянию солнечных лучей газовой и аэрозольной компонентами атмосферы, свечению ночного неба, яркости и цвету дневного и сумеречного неба. Одновременно он изучал и такие явления, как зодиакальный свет и противосияние,— свечение облака межпланетной пыли в плоскости земной орбиты.

Известный исследователь метеоров член-корреспондент АН СССР В. В. Федынский (1908—1978), развивая методы изучения дрейфа метеорных следов, показал, какое значе-

ние имеют эти исследования для более глубокого понимания циркуляции земной атмосферы. Другим способом изучения атмосферной циркуляции являются наблюдения движений серебристых облаков, на что В. В. Федынский не раз обращал самое пристальное внимание.

Один из виднейших советских астрономов-фотометристов, исследователь планет профессор В. В. Шаронов (1901—1964) с середины 50-х годов активно включился в исследования серебристых облаков, организовал их фотометрические наблюдения, в течение семи лет возглавлял комиссию по исследованиям серебристых облаков Комитета по Международному геофизическому году.

Зачинателями исследований серебристых облаков в нашей стране были такие известные астрономы, как И. С. Астапович, Л. А. Кулик, Е. Л. Кринов, В. А. Мальцев, Д. Я. Мартынов, И. И. Путилин, Н. Н. Сытинская. Автор этой книги, астроном по специальности, занимается изучением серебристых облаков с 1936 г.

Большое внимание уделяют наблюдениям серебристых облаков советские любители астрономии и в наше время. Их работу организует и направляет Всесоюзное астрономо-геодезическое общество (ВАГО); при Центральном совете ВАГО существует отдел серебристых облаков, возглавляемый в настоящее время В. А. Ромейко. Отдел ежегодно, начиная с 1979 г., выпускает сводки наблюдений серебристых (мезосферных) облаков за предыдущий год: «Мезо-81», «Мезо-82» и т. д. Другой центр исследований серебристых облаков существует при Томском отделении ВАГО, где под руководством Н. П. Фаст составлены и опубликованы два каталога появлений этих облаков. Общее руководство всеми исследованиями серебристых облаков в СССР осуществляет Комиссия по мезосферным исследованиям Междуведомственного геофизического комитета при Президиуме АН СССР.

Прежде чем приступить к систематическим наблюдениям серебристых облаков, надо четко поставить перед собой задачи наблюдений. Ведь наблюдения могут быть различными, их организация, методика и проведение зависят от поставленных задач. Наблюдать «просто так», лишь бы увидеть или сфотографировать серебристые облака, бессмысленно.

Задачи любительских наблюдений серебристых облаков могут быть предложены следующие.

1. Синоптические наблюдения, т. е. систематические наблюдения сумеречного сегмента с целью установления факта наличия или отсутствия серебристых

облаков, а в случае их видимости — регистрации некоторых характерных признаков (протяженность по азимуту и высоте, яркость, морфологические формы).

Для выполнения этих наблюдений нужна площадка с открытым северным горизонтом, часы и призменный бинокль (можно наблюдать и невооруженным глазом).

2. Исследование структуры. Может производиться путем визуальных наблюдений, фотографирования или замедленной киносъемки. Ценность наблюдений возрастает по мере перехода от первого метода к третьему. Необходимые инструменты: бинокль, один-три фотоаппарата типа «Зенит», кинокамера.

3. Изучение движений серебристых облаков. Производится путем их последовательного фотографирования или замедленной киносъемки. Помимо фотоаппарата и кинокамеры, может понадобиться теодолит (для определения координат земных объектов).

4. Определение высот. Для решения этой задачи нужно фотографировать серебристые облака в заранее согласованные моменты из двух пунктов, разделенных расстоянием в 20÷30 км. Фотоаппараты в обоих пунктах должны быть одинаковыми. Нужны точные часы, проверяемые по радио. Для обработки наблюдений понадобится специальная палетка.

5. Фотометрия и поляриметрия. Производится по фотографиям. Однако для выполнения этих задач нужны дополнительные приспособления: трубчатый фотометр или специальный фонарь для калибровки снимков, насадка с просвечивающим экраном для стандартизации, для поляриметрии нужны три совершенно одинаковых фотоаппарата и три поляроида. Придется сделать и небольшое устройство для одновременности экспозиций.

Некоторые из описанных выше задач можно выполнять по одним и тем же наблюдениям. Так, одни и те же фотографии можно использовать для изучения структуры, движений, определения высот и фотометрии серебристых облаков, если принять все необходимые меры для обеспечения пригодности фотографий к решению этих задач, а именно, если записаны точные моменты экспозиций (иначе не удастся измерить высоты и скорости), если на снимках вышли звезды или земные ориентиры с известными координатами (нужны для определения высот и скоростей), если проведены стандартизация и калибровка снимков (для фотометрии). Наблюдатель-синоптик может в перерывах между записями фотографировать серебристые облака. При этом надо ра-

ботать так, чтобы ни одна из поставленных задач не страдала.

Естественно, что кружок любителей астрономии может сделать больше, чем наблюдатель-одиночка. При наличии нескольких фотоаппаратов задачи можно разделить между двумя-тремя группами наблюдателей. Одна группа ведет только синоптические наблюдения, другая группа фотографирует с целью измерения высот и скоростей (и выполняет теодолитные измерения), третья занимается фотометрией и поляриметрией, четвертая осуществляет замедленную киносъемку.

Нужно твердо запомнить, что проведение даже успешных наблюдений — это только полдела. Вторая половина работы — это о б р а б о т к а наблюдений. Обработка состоит в проведении измерений фотографий и в выполнении некоторых вычислений, чтобы получить искомые величины (значения высот деталей серебристых облаков, векторов их скоростей, значения яркости в фотометрических единицах, степени поляризации и т. д.). Обработку завершает обобщение результатов, т. е. построение графиков или составление таблиц, куда заносятся все полученные величины, а затем их анализ и формулировка полученных выводов. Для обработки наблюдений могут потребоваться специальные лабораторные приборы. Так, для обработки фотометрических и поляриметрических наблюдений понадобится микрофотометр, для измерений снимков — специальные палетки, которые можно будет изготовить самим, для вычислений понадобятся микрокалькуляторы и таблицы.

О том, как производить все виды наблюдений, а также их обработку, будет подробно рассказано в следующих параграфах.

§ 11. СИНОПТИЧЕСКИЕ НАБЛЮДЕНИЯ

Синоптические наблюдения — термин, заимствованный из метеорологии. Он происходит от греческого слова «синопсис», что означает обзор. Эти наблюдения имеют целью статистику появлений серебристых облаков. По данным синоптических наблюдений строятся распределения появлений серебристых облаков по широтам, сезонам и другим признакам (долготам, баллам яркости и т. д.).

Возможность увидеть серебристые облака во многом зависит от погоды, точнее, от наличия обычных, тропосферных облаков в сумеречном сегменте. Начиная с Международного геофизического года (1957), состояние сумеречного

сегмента принято оценивать по следующей буквенной шкале:

А — сумеречное небо совершенно безоблачно,

Б — сумеречное небо частично, до 50%, закрыто отдельными облаками нижнего или верхнего ярусов,

В — сумеречное небо до 80% закрыто тропосферной облачностью,

Г — сумеречное небо видно только через небольшие окна в тропосферных облаках,

Д — сумеречное небо полностью закрыто тропосферными облаками.

Одна из этих букв проставляется в графе 6 журнала наблюдений (приводим его форму).

Сразу же предупреждаем наблюдателей, что четкое, разборчивое заполнение журнала наблюдений — совершенно

Форма 1

ЖУРНАЛ
ПАТРУЛИРОВАНИЯ СУМЕРЕЧНОГО НЕБА
И СЕРЕБРИСТЫХ ОБЛАКОВ

1. Наименование наблюдательного пункта (станции) ________________

____

2. Координаты: широта ______________, долгота ______________

3. Адрес пункта: ________________________________

____

4. Характер наблюдательной площадки ________________

____

5. Дополнительные данные ________________________

____

Дата	Время (декретное)	Серебристые облака			Метеорологические данные			Примечания
		наличие	яркость (по 5-балльной шкале)	присутствующие морфологические формы	закрытие сектора зари обычными облаками	облачность для всего неба		
						общая	нижняя	
1	2	3	4	5	6	7	8	9

необходимое требование. Журнал надо заполнять так, чтобы записи мог разобрать любой человек, знакомый с методикой наблюдений. Если допущена ошибка, неверное слово или цифры надо аккуратно зачеркнуть одной чертой так, чтобы было видно, что зачеркнуто, и сверху или сбоку написать верное значение или слово. Категорически запрещается стирать, замазывать или зачеркивать «наглухо» ошибочное место. Не следует его также ставить в скобки, как делают в школе.

Наименование наблюдательного пункта обычно совпадает с названием того населенного пункта, где ведутся наблюдения (например, Малаховка, Сигулда, Лесное). Если наблюдения ведутся в городе, где могут работать и другие наблюдатели, к названию города добавляется присвоенная данному наблюдательному пункту цифра (например, Ярославль-2, Новосибирск-4 и т. д.). Цифра (номер пункта в данном городе) присваивается местным отделением ВАГО, а если в этом городе отделения ВАГО нет,— отделом серебристых облаков Центрального совета ВАГО.

Координаты наблюдательного пункта следует определить с помощью теодолита одним из методов, изложенных в гл. II Постоянной части «Астрономического календаря» (7-е изд.— М.: Наука, 1981).

Время указывается местное декретное. В заголовке графы 2 надо указать различие этого времени с московским в часах (например, мос. +3 часа). Нужно помнить, что в период наблюдений серебристых облаков, а точнее, с 1 апреля до 1 октября, в нашей стране действует летнее время, идущее на 1 час впереди зимнего. Разность местного времени с московским при этом, как правило, не меняется (исключения возможны в случае, если в какой-нибудь области, крае или республике летнее время введено не будет).

Время надо указывать с точностью до минуты. Наблюдения ведутся каждые 15 минут, начиная с целого часа или с числа минут, кратного 15, т. е., например, 22 ч 00 мин, 22 ч 15 мин, 22 ч 30 мин, 22 ч 45 мин и т. д.

Поскольку ночь наблюдений охватывает обычно две даты, в графе 1 надо указывать обе, например, 15—16.VII.

Календарь наблюдений, где указаны часы потенциальной видимости серебристых облаков, соответствующие погружениям Солнца от 6 до 18°, приведен в Приложении.

Наличие серебристых облаков в графе 3 указывается одним из следующих слов: «есть» или «нет». Если из-за проходящей или частичной облачности наблюдатель не вполне

уверен в о т с у т с т в и и серебристых облаков, в графе 3 пишется «нет?». Ту же запись делают в случае других помех (городское освещение, туман). Если же сумеречный сегмент чист и наблюдатель, осмотрев его в бинокль, совершенно убежден в отсутствии серебристых облаков, в графе 3 пишется «нет!». Если сегмент полностью закрыт тропосферными облаками (балл Д в графе 6), в графе 3 делается прочерк (—). Точно так же неуверенность в н а л и ч и и серебристых облаков передается вопросительным знаком («есть?»), а полная уверенность восклицательным («есть!»).

В графе 4 отмечается яркость серебристых облаков по следующей 5-балльной шкале:

1 — очень слабые серебристые облака, едва заметные на фоне сумеречного сегмента, обнаруживаются только при очень внимательном осмотре неба,

2 — облака замечаются легко, но их яркость весьма мала,

3 — облака хорошо заметны и резко выделяются на фоне сумерек,

4 — яркие облака, привлекающие к себе внимание,

5 — исключительно яркие серебристые облака.

В графу 5 заносятся обозначения наблюдаемых морфологических форм серебристых облаков, в соответствии с классификацией, приведенной в § 4, например, II-a, III-a, IV-b.

О том, как заполняется графа 6, было сказано выше. Общая облачность (графа 7) и облачность нижнего яруса (графа 8) оценивается по 10-балльной шкале, применяемой в метеорологии, от 0 (совершенно безоблачное небо) до 10 (небо полностью закрыто облаками).

Наконец, в графе 9 записываются все обстоятельства, которые так или иначе относятся к данному наблюдению (дождь, туман, усталость наблюдателя).

Журнал наблюдения за каждую дату подписывается наблюдателем. Если наблюдают двое, подписываются оба.

Желательно (ради однородности наблюдательного ряда), чтобы наблюдения в данном пункте вели один или два наблюдателя, но не более. Некоторое время оба наблюдателя должны вести наблюдения одновременно и независимо (для их сопоставления).

Важнейшее условие для ценности синоптических наблюдений — их систематичность. Наблюдения нужно вести в течение всего сезона наблюдения.

По окончании наблюдательного сезона нужно подвести итоги наблюдений: подсчитать распределение появлений по месяцам и декадам, по часам суток, по баллам яркости,

по морфологическим формам. Сводку наблюдений нужно выслать в Центральный совет ВАГО (адрес — на с. 123).

Сведения об интервалах времени, когда могут наблюдаться серебристые облака в течение всего периода их видимости (календарь наблюдений) для широт 45—60°, приведены в Приложении 2.

§ 12. ФОТОГРАФИРОВАНИЕ СЕРЕБРИСТЫХ ОБЛАКОВ

Фотографировать серебристые облака можно любым фотоаппаратом («Любитель», «Зоркий», «Киев», «Зенит», «ФЭД-2», «Смена» и др.), а также фотокамерами, изготовленными специально для получения крупномасштабных снимков. Наиболее подходящими являются фотокамеры с фокусным расстоянием оптики от 10 до 50 см и с размерами кадра от 9×12 до 18×24 см. Это могут быть аэрофотокамеры или самодельные камеры, построенные на базе объективов типа «Ортагоз» (от фотоаппарата «Фотокор»», $F=135$ мм, 1 : 4,5, формат пластинок 9×12 см), «Индустар-51» ($F=210$ мм, 1 : 4,5, кадр 13×18 см), «Индустар-37» ($F=300$ мм, 1 : 4,5, кадр 18×24 см), «Индустар-52» ($F=500$ мм, 1 : 5, кадр 18×24 см). Крупномасштабные фотографии намного удобнее для измерений координат деталей, чем малоформатные.

Если наблюдатель — не одиночка, а входит в состав кружка, то организация, при которой состоит кружок (отделение ВАГО, станция юных техников, дом или дворец пионеров и школьников, планетарий), вполне может получить от соответствующих учреждений списанные аэрофотокамеры. Очень удобны для съемки серебристых облаков аэрофотокамеры «АФА-ИМ» с объективом «Индустар-51» и «НАФА-6» с объективом «Индустар-52». Обе они работают на широкой 19-сантиметровой пленке, рулон которой рассчитан на 50—150 кадров, а перемотка осуществляется от электропривода.

Любители-одиночки могут фотографировать серебристые облака малоформатными аппаратами, рассчитанными на размер кадра 24×36 мм или 6×6 см. И такие снимки представляют научную ценность. При съемке аппарат должен быть отфокусирован на бесконечность. Снимать надо при полном отверстии. Поскольку относительное отверстие любительских фотоаппаратов заключено в пределах от 1 : 2 до 1 : 4,5, а чувствительность применяемой пленки от 65 до 250 единиц ГОСТ, время экспозиции будет в пределах от нескольких секунд до 2—3 минут.

Приводим таблицу для расчета времени экспозиций, составленную по данным М. А. Дирикиса для чувствительности пленки 250 ед. ГОСТ при относительном отверстии 1 : 3,5. Аргументом является погружение Солнца под горизонт (отрицательная высота) в градусах.

Таблица 1

$-h_{\odot}$	Время эксп., с	$-h_{\odot}$	Время эксп., с	$-h_{\odot}$	Время эксп., с
6,0—6,6	3	8,5—8,7	24	11,1—11,4	90
6,7—7,2	6	8,8—9,3	30	11,5—11,9	120
7,3—7,5	9	9,4—9,6	36	12,0—12,3	150
7,6—7,8	12	9,7—10,2	45	12,4—12,6	180
7,9—8,1	15	10,3—10,8	60	12,7—13,0	240
8,2—8,4	18	10,9—11,0	75	13,1—13,2	300

Для других относительных отверстий и чувствительности пленки экспозиции нетрудно пересчитать, полагая величину экспозиции обратно пропорциональной чувствительности и квадрату относительного отверстия (надо помнить, что последняя величина меньше единицы, например, относительное отверстие, обозначаемое как 1 : 2, численно равно 0,5, обозначению 1 : 4,5 соответствует число 0,22 и т. д.).

Для фотографирования серебристых облаков аппарат (или аппараты, если их несколько) следует укрепить на прочной установке. Нельзя фотографировать с рук или со штатива-треноги. В качестве установки может служить деревянная доска или металлическая пластинка толщиной не менее 5 мм, укрепленная под углом 10° к горизонту. На нее с помощью винтов, пропущенных снизу через проделанные в доске отверстия, крепятся фотоаппараты. Чтобы аппараты нельзя было случайно повернуть или сбить с точной установки по азимуту, на доске укрепляются специальные планки-фиксаторы, к которым прижимаются корпусы аппаратов. Пример такой установки показан на рис. 37. Здесь на одной доске установлены три одинаковых фотоаппарата «ФЭД-2». Сама установка тремя винтами закрепляется на столе или на столбе. Аппараты развернуты для панорамной съемки всего северного горизонта. Средний аппарат направлен точно на север, два других — под углом 30° от этого направления к востоку и западу.

Экспозиции делаются при помощи тросиков. Указатель длительности экспозиции ставится на отметку «В». Чтобы

при съемке тремя аппаратами экспозиции производились одновременно, применяется нехитрое приспособление из двух планок, соединенных пружинками. В одной из планок проделываются отверстия, в которые пропускаются тросики так, чтобы своими головками они упирались в другую (верхнюю) планку. Помимо пружинок обе планки соединяются штифтами (пружинки можно заделать внутрь штифтов).

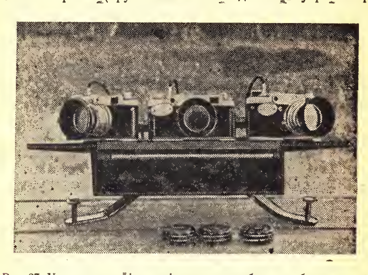


Рис. 37. Установка для фотографирования серебристых облаков с тремя аппаратами, развернутыми для панорамной съемки.

тов). Нажатие всех трех тросиков производится одновременно двумя руками, как показано на рис. 38. Если применяется один аппарат, это устройство не нужно.

Длительность экспозиций определяется по секундомеру, выверенному метроному или в крайнем случае по часам с длинной секундной стрелкой.

Для предохранения объективов аппаратов от росы следует применять специальные насадки, в качестве которых можно использовать солнечные бленды, как показано на рис. 37. При их отсутствии насадки можно сделать из картона, который надо зачернить черной тушью.

Как показал опыт, серебристые облака выгодно снимать со светофильтром ЖС-17, повышающим контраст облаков с фоном неба. В этом случае, а также при применении поляроидов (см. § 16), налет росы с поверхности светофильтров надо снимать чистыми фланелевыми тампонами. Касаться

поверхностей объективов и светофильтров руками, а также носовым платком категорически запрещается. По окончании работы объективы надо закрыть крышками.

Моменты экспозиций выбираются те же, что и при синоптических наблюдениях (§ 11), т. е. кратные 15 минутам. Начало экспозиции делается в нулевую секунду (15 мин 00 с, 30 мин 00 с и т. д.). Чтобы обеспечить такую точность, надо иметь хорошие часы, которые регулярно проверять по радиосигналам времени и систематически записывать в

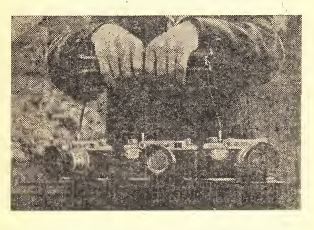


Рис. 38. Устройство для одновременного производства экспозиций на трех аппаратах.

специальный журнал их поправки. Если есть возможность, для наблюдений нужно выделить специальные часы с большой секундной стрелкой, которые не носятся на руке, а хранятся в горизонтальном положении в футляре. При таком хранении постоянство хода часов заметно улучшается.

Для снятия показаний часов и производства записей в журнал наблюдений нужно иметь фонарик. Чтобы яркий свет фонаря не резал глаза, фонарик следует прикрыть красным светофильтром.

Наблюдения записываются в журнал фотографирования по приводимой форме.

Проявление фотоматериалов. Наблюдатель должен непременно сам проявлять, фиксировать, промывать и сушить пленки или пластинки с фотографиями серебристых облаков, не доверяя проявление пленок фотолабораториям сети бытового обслуживания или

Форма 2

ЖУРНАЛ
ФОТОГРАФИРОВАНИЯ СЕРЕБРИСТЫХ ОБЛАКОВ

Дата ________________ Наблюдатель ________________

Тип фотоаппарата (аппаратов) ________________

Сорт фотоматериала ________________

Светофильтры ________________

Другие приборы и приспособления ________________

Фотографирование:

№ экспозиции							
Время начала экспозиции							
Продолжительность экспозиций							
Направление съемки (азимут центра снимка)							

Наличие структурных форм и краткое описание серебристых облаков ________________

Строение поля серебристых облаков (подробное описание и схематический рисунок — на отдельном листе) ________________

____

Яркость серебристых облаков ________________

____

Дополнительные сведения ________________

____

Причина окончания наблюдений (рассвет, исчезновение серебристых облаков, смена дежурства) ________________

Время начала и окончания наблюдений ________________

Примечания ________________

____

Подпись наблюдателя

фотографам-профессионалам. Дело в том, что правила лабораторной обработки научных фотографий гораздо строже, чем для обработки любительских снимков. Нарушение этих правил может сделать снимок непригодным для обработки.

Нужно помнить, что основным документом, результатом наблюдения является негатив. Именно негативы подлежат научной обработке, измерению и исследованию. Фотоотпечатки — это не более как картинки, разумеется, необходимые как иллюстрации наблюдавшегося явления, а порой подлежащие опубликованию в научной печати. Но основная работа ведется с негативами. Поэтому следует стремиться к получению высококачественных негативов, а для этого надо не только соблюдать приведенные выше рекомендации по фотографированию, но и правила лабораторной обработки.

Проявитель надо составлять незадолго до времени проявления. Можно рекомендовать такой состав проявителя:

метол	7,5 г,
сульфит натрия безводный	100 г,
вода дистиллированная	до 1 л.

Время проявления — 20 минут при температуре 20°С. Время и температуру проявления надо выдерживать с возможно большей точностью. Каждую пластинку или пленку надо проявлять в свежем растворе. Если кювета достаточно велика, в нее можно погружать одновременно несколько пластинок. Но последовательное проявление нескольких пластинок или пленок в одном растворе, применение подкрепляющих добавлений не допускается. Нельзя также применять в научной фотографии усиление или ослабление негативов.

После проявления пластинки ополаскиваются в воде и погружаются в фиксаж. В качестве фиксирующего раствора рекомендуется простой фиксаж следующего состава:

гипосульфит	250 г,
вода дистилированная	до 1 л.

Применение быстродействующих фиксажных растворов недопустимо, так как они несколько ослабляют негативное изображение. Фиксирование надо проводить в темноте до полного исчезновения невосстановленных солей серебра и затем еще столько же времени. Во время работы надо следить за тем, чтобы не занести хотя бы каплю фиксажа в проявитель. Для этого лучше всего работать вдвоем: один

работает только с проявителем, а другой — только с фиксажем. Если работать приходится одному, надо разделить эти функции между левой и правой руками.

После окончания фиксирования пластинки или пленки промываются не менее 30 минут в проточной воде и ополаскиваются дистиллированной водой. Если наблюдатель не располагает дистиллированной водой, перед просушкой надо удалить крупные капли воды мягкими тампонами. При проявлении пленок в круглых фотобачках надо иметь в виду, что условия проявления внутренних и наружных витков спирали значительно различаются. Поэтому лучше пленки проявлять не в круглых бачках, а изготовить специальную рамку для наматывания пленки зигзагообразно, в 6—8 рядов; для проявления вся рамка с пленками погружается в глубокую кювету или бачок прямоугольного сечения. Дальнейшая обработка производится так же, как и в случае пластинок.



Рис. 39. Кармашки для хранения пленок.

После завершения лабораторной обработки и просушки пленки и пластинки тщательно просматривают с помощью лупы. Этот просмотр имеет целью выбрать снимки, пригодные для научной обработки, для изготовления фотоотпечатков, а также выявить возможные дефекты съемки. К последним относятся: неточная фокусировка, неправильный подбор времени экспозиций, дефекты самой пленки или пластинки (царапины, пузыри и т. д.), дефекты от некачественного проявления или промывки, засветы от посторонних источников света, размытость изображения из-за оседания росы на объективе, несрабатывание затвора и пр.

Все снимки нумеруются теми же номерами, под которыми они занесены в журнал, на каждой пластинке или пленке ставится дата съемки, например, так: 26.07.83, что должно означать 26—27 июля 1983 г. (из двух дат, разделенных полуночью, для краткости записи указывается первая дата). Нумерация снимков производится простым карандашом по эмульсии, дата пишется чернилами со стороны стекла или целлулоида.

В дальнейшем хранить негативы в рулончиках пленок не рекомендуется. Их надо разрезать по кадрам и вставить в специальные бумажные или картонные кармашки, помещаемые в альбоме для хранения пленок, как показано на

рис. 39. Все данные (дата и номер снимка) пишутся на кармашке.

Пластинки лучше всего хранить в вертикальном положении и не вплотную одна к другой, как они лежат в коробках, а разделяя их прокладками из картона или плотной бумаги, имеющими форму прямоугольной рамки, так что только внешние части пластинок (шириной не более 5 мм) будут касаться этих прокладок. Коробки с пластинками и альбомы с пленками надо хранить в шкафу в сухом помещении. На каждой коробке или альбоме надо написать год и даты съемки, объект съемки (серебристые облака), фамилию наблюдателя (наблюдателей).

Фотографии серебристых облаков — важный научный документ, поэтому они должны сохраняться надолго. В случае отсутствия условий для хранения, прекращения наблюдений, невозможности их обрабатывать все наблюдения нужно передать Центральному совету или ближайшему отделению ВАГО (адрес приведен в конце книги).

§ 13. КИНОСЪЕМКА СЕРЕБРИСТЫХ ОБЛАКОВ

Мы уже не раз говорили о преимуществах, которые представляет замедленная киносъемка серебристых облаков перед серией обычных фотографий для изучения динамики облачных полей и особенно волновых движений.

Развитие в нашей стране кинолюбительства, наличие в продаже большого количества любительских кинокамер позволяет рекомендовать тем любителям астрономии, которые имеют или могут приобрести 16-миллиметровую любительскую кинокамеру, использовать ее для замедленной киносъемки серебристых облаков. Разумеется, если есть возможность использовать репортерские или профессиональные кинокамеры (например, во дворце пионеров или на станции юных техников, где есть кружок кинолюбителей) с 35-миллиметровой пленкой, это даст еще лучший результат благодаря большему масштабу и четкости изображения.

Для выполнения замедленной киносъемки следует применить раферную или цейтраферную редукторную приставку. Раферная приставка замедляет весь процесс киносъемки, увеличивая и время экспозиции, и время закрытия кадра обтюратором кинокамеры. При съемке ярких серебристых облаков этот способ годится, но если облака не очень яркие, он приведет к бесполезной потере времени, которое

можно было бы использовать для увеличения времени экспозиции.

Цейтраферная приставка обеспечивает длительную экспозицию и быструю смену кадров, после чего начинается новая экспозиция. Это позволяет получить значительный выигрыш во времени экспозиции при той же скорости съемки по сравнению с раферным способом.

Оптимальная длительность экспозиции при замедленной киносъемке 5—10 секунд. Смена кадров при использовании цейтраферной приставки занимает не более 0,5 секунды. Таким образом, замедление съемки при скорости демонстрации 24 кадра в секунду будет в 120—140 раз и во столько же раз будет ускорена динамика поля облаков при просмотре фильма. Ночь (4 часа) пройдет на экране за 1—2 минуты.

Выбранные условия съемки в течение ночи менять не следует. Однако приходится считаться с тем, что в течение ночи яркость сумеречного сегмента и самих серебристых облаков сильно меняется. Это можно компенсировать изменением действующего отверстия объектива с помощью диафрагмы. Правда, в этом случае фильм нельзя будет использовать для фотометрических целей. Желательно использовать кинопленку с большой широтой и высокой чувствительностью. Для того чтобы каждый кадр можно было привязать по времени, т. е. знать точный момент съемки, рекомендуется применять следующий прием. Раз в 10 минут (с точностью до секунды) объектив на 10 секунд закрывается крышкой. На пленке 1—2 кадра выйдут светлыми, непроэкспонированными. По ним можно будет найти момент каждого кадра, поскольку за 10-минутный интервал (600 секунд) пройдет, в зависимости от избранного времени экспозиции, 60—120 кадров. Сосчитав число кадров между неэкспонированными, нетрудно определить скорость съемки и момент каждого кадра. Моменты закрытий объектива надо записывать в журнал. При просмотре фильма неэкспонированные кадры мешать не будут, так как на позитиве они выйдут темными.

Прежде чем приступать к замедленной киносъемке серебристых облаков, надо потренироваться в съемке обычных (тропосферных) облаков, которые имеют очень быстрые видимые движения (разумеется, снимать их, даже в начале сумерек, надо с меньшим временем экспозиции, чем серебристые облака — не более 5 секунд). Далее, надо поснимать сумеречный сегмент, меняя экспозиции, для более удачного выбора экспозиции, наилучшим образом соответствующей

имеющемуся киноматериалу и аппаратуре. После завершения пробных съемок, проявления и просмотра пленки можно приступать к съемке серебристых облаков.

Кинокамера должна быть установлена на прочном штативе, допускающем поворот по азимуту, поскольку область появления серебристых облаков заранее наблюдателю неизвестна. На специальном столике или подставке размещается раферная или цейтраферная приставка с редуктором.

При ориентировке камеры необходимо, чтобы поле ее зрения захватывало часть горизонта с земными ориентирами. Их горизонтальные координаты надо определить с помощью теодолита. При отсутствии четких ориентиров их надо сделать самому, установив к северу, северо-востоку и северо-западу от наблюдательного пункта три столба с лампочками наверху, питаемыми от батареек или аккумуляторов. На время съемки их надо включать, по окончании — выключать.

Одновременно с киносъемкой рекомендуется проводить крупномасштабное фотографирование серебристых облаков, как было рассказано в § 12. Сравнение кинокадров с крупномасштабными фотографиями (9×12 или 18×24) позволит привязать измерения на кинокадрах к более точным измерениям на фотографиях, что повысит точность результатов.

Снятые кинофильмы придется отдавать для проявления в специальные лаборатории по обработке любительских кинофильмов. Если в данном городе есть киностудии научно-популярных или учебных кинофильмов, желательно договориться с ними о проявлении снятых вами фильмов о серебристых облаках. К кинофильму можно затем доснять титры и вмонтировать их, чтобы фильм был понятен каждому без пояснений. При желании можно фильм «озвучить», записав рассказ о заснятом явлении на магнитофон. В титрах и звуковом сопровождении надо указать объект съемки, год и место наблюдений, ночь съемки, обратить внимание на характерные явления (наличие волновых образований, двухслойность серебристых облаков, движения в разных направлениях, образование вихрей). Можно отмечать основные морфологические формы.

Приведем пример такого дикторского текста:

«Серебристые облака — самые высокие облака земной атмосферы. Они плавают на высотах 75÷90 километров. Этот фильм снят по методу замедленной киносъемки летом 1982 года в Перхушкове Московской области членами отдела серебристых облаков Московского отделения Всесоюз-

ного астрономо-геодезического общества Валентином Ивановым и Игорем Николаевым под руководством Виталия Александровича Ромейко».

(Этот текст идет под монтаж из неподвижных фотографий серебристых облаков или под повтор кадров кинофильма, которые еще будут показаны в дальнейшем, на «своем месте».)

«Ночь с 5 на 6 июля. Уже в 21 час 45 минут появились яркие серебристые облака. Преобладают формы II-a, III-a и III-b по морфологической классификации. Движение направлено на юго-запад. Выходя за пределы сумеречного сегмента, серебристые облака исчезают. Видно, как поднимается звезда Капелла, а за ней бета Возничего» и т. д.

Каждый из таких отрывков занимает 30÷40 секунд времени. Между отдельными фразами можно делать паузы. Озвученный таким образом фильм можно с успехом показывать на занятиях кружка, на собрании отделения ВАГО, на слете юных любителей астрономии, на вечерах отдыха и других культурных мероприятиях. Он может быть использован также как сопровождение лекций, читаемых в планетарии или в красных уголках предприятий, в школах и иных местах.

§ 14. РАЗВЕРТКА ПОЛЕЙ СЕРЕБРИСТЫХ ОБЛАКОВ НА ЗЕМНУЮ ПОВЕРХНОСТЬ И ОПРЕДЕЛЕНИЕ ИХ ДВИЖЕНИЙ

Получить хорошие фотографии или кинокадры серебристых облаков — это только полдела. Дальше нужно их обработать, чтобы получить те или иные научные результаты, в зависимости от поставленной задачи. Об этом уже говорилось в § 10.

Здесь мы опишем простую методику перехода от фотографии, представляющей собой изображение серебристых облаков в проекции на небесную сферу, к схеме пространственного расположения этих образований в проекции на земную поверхность. Такая операция называется *развертыванием*, а ее результат — *разверткой*.

Для успешного решения этой задачи необходимо знать следующие величины:

1) Фокусное расстояние фотокамеры; как правило, оно слегка отличается от указанного на оправе объектива; однако в первом приближении можно использовать номинальное значение F.

2) Положение центра снимка и его горизонтальные координаты.

3) Положение линии горизонта на снимке.

4) Географические координаты наблюдательного пункта.

Рассмотрим простой способ определения координат центра снимка. Для его обозначения на снимке проводим простым карандашом по эмульсии негатива близ его центра отрезки диагоналей, пересечение которых и обозначит центр снимка. Для удобства делаем в этом месте легкий накол иголкой.

Для определения координат этого центра, азимута A_0 и высоты h_0, необходимо иметь на снимке несколько точек с известными координатами A, h. Это могут быть городские сооружения (вершина шпиля башни, заводской трубы и т. д.) или специально установленные столбы с лампочками наверху, о которых уже говорилось. Не рекомендуется выбирать в качестве ориентиров верхушки деревьев или тонкие приемные телеантенны, так как они могут раскачиваться ветром. Координаты выбранных ориентиров определяются с помощью теодолита.

В качестве опорных точек можно использовать и звезды, для которых по известному моменту съемки и экваториальным координатам вычисляются горизонтальные координаты A, h. Как это делать, рассказано в Постоянной части «Астрономического календаря» и в учебниках общей астрономии для вузов. В значения высоты звезд вводятся поправки за рефракцию.

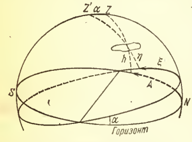


Рис. 40. Вспомогательная система сферических координат ξ, η.

Если аппарат имеет наклон оптической оси к плоскости горизонта на угол α ($\alpha \approx 10°$), то целесообразно ввести вспомогательную систему сферических координат, наклоненную на угол α к горизонтальной системе (рис. 40). Роль «азимута» будет играть угол ξ, а роль «высоты» — угол η. На снимке мы с помощью прямоугольной прозрачной палетки или измерительного прибора измеряем прямоугольные координаты деталей x, y, отсчитываемые от найденного нами центра снимка. Если координаты приходится отсчитывать от другого начала (обозначим их x', y'), то нужные нам координаты x, y мы найдем по формулам

$$x = x' - x_c, \quad y = y' - y_c, \tag{23}$$

где x_c, y_c — координаты центра снимка в той же системе.

Далее по значениям x, y находим сферические координаты ξ, η по формулам

$$\operatorname{tg} \xi = \frac{x}{F}, \tag{24}$$

$$\operatorname{tg} \eta = \frac{y}{F} \cos \xi. \tag{25}$$

При этом мы полагаем, что координаты центра снимка $\xi_0=0$, $\eta_0=0$, и учитываем знаки каждой координаты, считая их положительными вверх и вправо от центра. Найдя для каждого ориентира значения ξ, η, вычисляем разности $A - A_0$ по формуле

$$\sin (A - A_0) = \frac{\cos \eta \sin \xi}{\cos h}. \tag{26}$$

Значения A, h нам известны из прямых измерений теодолитом (а для звезд из вычислений). Точки, для которых $A - A_0 > 10°$ и $h - h_0 > 10°$, отбрасываем, для остальных по $A - A_0$ и известным A находим A_0 и из полученных значений (которые должны слабо отличаться друг от друга) находим среднее. Это и будет азимут центра снимка. Его высота h_0 находится по формуле

$$h_0 = \frac{h - \eta}{\cos (A - A_0)}. \tag{27}$$

Значения h_0, полученные по разным ориентирам, тоже усредняем. Отдельные значения h_0 должны отличаться друг от друга не более чем на 2—3′. Если получатся более сильные расхождения, значит, допущены ошибки в измерениях или вычислениях, и их надо проверить.

До сих пор мы предполагали, что изображение линии горизонта на снимке параллельно нижней стороне кадра. Однако если мы применяем три аппарата для панорамной съемки, как показано на рис. 37, для двух крайних аппаратов это условие выполнено не будет. Поэтому приведем формулы, с помощью которых можно построить изображение линии горизонта в этом случае.

Уравнение этой линии в прямоугольных координатах имеет вид *)

$$\sin^2 h \cdot x^2 + (\sin^2 h_0 - \cos^2 h)\, y^2 - 2 \sin h_0 \cos h_0 \cdot y + (\cos^2 h_0 - \cos^2 h) = 0. \tag{28}$$

*) См. книгу: *Бугославская Е. Я.* Фотографическая астрометрия.— М.: Гостехиздат, 1947, с. 101.

Поскольку нам известно h_0 и для каждого ориентира его высота h, мы можем решить квадратное уравнение (28) относительно y (x берем из измерений) для каждого ориентира. Откладывая затем отрезки, равные y, вниз от точки ориентира, получим ряд точек горизонта, которые должны лечь на дугу малой кривизны, близкую к прямой линии.

Однако полученная линия горизонта — лишь первое приближение, поскольку координаты x, использованные нами в уравнении (28), измерены в системе, слегка повернутой относительно проекции линии горизонта. Выйти из положения можно двумя способами. Во-первых, можно заново измерить значения x, y, сориентировав ось x палетки или измерительного прибора параллельно найденной в первом приближении линии горизонта, и затем повторить расчет по формуле (28). Мы получим новую линию горизонта, которая должна пройти близко от первой или даже может совпасть с ней.

Второй способ состоит в том, что измеряется угол поворота γ найденной в первом приближении линии горизонта относительно оси, проходящей параллельно нижней стороне кадра. Новые координаты x, y выразятся тогда через старые x', y' формулами

$$\begin{aligned} x &= x' \cos\gamma + y' \sin\gamma, \\ y &= -x' \sin\gamma + y' \cos\gamma, \end{aligned} \qquad (29)$$

причем угол γ считается положительным, если поворот осей координат происходит против часовой стрелки, и отрицательным, если по часовой стрелке. После этого по значениям x, y вновь находим линию горизонта.

Оба способа целесообразно применять параллельно, для взаимного контроля. Подчеркиваем, что все эти расчеты, измерения и построения нужно делать не для каждого кадра, а лишь о д и н р а з для данной ориентации аппарата. Поэтому целесообразно заранее позаботиться о фиксации положения как аппаратов на установочной доске, так и самой доски на столбе (столе). Этим мы намного облегчим себе работу по обработке фотографий.

Необходимо еще раз подчеркнуть необходимость производить математическую обработку фотографий серебристых облаков, без которой они превратятся в красивые, но почти бесполезные картинки. Не надо бояться вычислений. Напротив, надо научиться быстро и правильно вычислять и, что не менее важно, правильно и аккуратно записывать результаты вычислений. Ни в коем случае нельзя вычислять на клочках бумаги, а тем более — выбрасывать потом эти

листки. Все вычисления надо вести в специальной тетради, причем записываются не только окончательные, но и все промежуточные результаты вычислений. Формулы, по которым ведутся вычисления, выписываются сверху, после чего все обозначения и числа располагаются столбиками. Арифметические знаки действий (плюс, минус и др.), а также знак равенства не пишутся. Перед отрицательными величинами ставится знак минус. Приведем пример расположения вычислений (табл. 2).

Хотя согласно правилам, изложенным выше, данные по ориентиру № 6 следует исключить из обработки, так как $(A - A_0) > 10^\circ$, этот ориентир дает значение h_0 в хорошем согласии с остальными и лишь A_0 для него «отскакивает» на $0^\circ,06$, т. е. на $3',6$ от среднего значения.

Сейчас в продаже имеются микрокалькуляторы «Электроника», доступные по цене и позволяющие быстро вычислять логарифмы, тригонометрические и обратные тригонометрические функции. При использовании микрокалькуляторов надо иметь в виду, что и в работе с ними может быть допущена ошибка (как вычислителем — например, нажал не на ту кнопку, так и самим прибором), поэтому рекомендуется каждый расчет проводить дважды; лучше всего, если это делают разные вычислители (это называется вычислением «в две руки»). При наличии расхождений производится третий расчет. Если расчеты производятся с помощью таблиц и арифмометра (когда нет калькулятора), это тем более необходимо.

Итак, все необходимые величины нам известны, и можно приступить к операции развертывания фотографии.

Для измерения координат серебристых облаков на снимках удобнее всего приготовить специальную палетку. Если фотографирование ведется с малоформатной камерой типа «Зенит», измерять самый кадр неудобно, и нужно воспользоваться фотоувеличителем. Заложив кадр в фотоувеличитель, кладем на столик лист бумаги и подбираем масштаб увеличения, который в дальнейшем будем использовать при обработке всех снимков. Под этот масштаб мы и рассчитаем палетку.

Эффективное фокусное расстояние F', соответствующее масштабу увеличенного изображения, равно

$$F' = F\frac{L}{l}, \qquad (30)$$

где F — фокусное расстояние объектива камеры, L и l — длины одних и тех же отрезков на увеличенном и ориги-

Таблица 2

Пример вычисления h_0, A_0 ($F=50$ мм)

№ ориентира	1	2	3	4	5	6
x, мм	−8,5	−5,2	+2,6	+4,4	+7,6	+10,2
y, мм	−2,5	−3,2	−1,6	−0,9	−4,7	−5,6
tg ξ	−0,1700	−0,1040	0,0520	0,0880	0,1520	0,2040
cos ξ	−0,9859	0,9946	0,9987	0,9962	0,9886	0,9798
sin ξ	−0,1676	−0,1034	0,0519	0,0877	0,1503	0,1999
tg η	−0,0493	−0,0637	0,0320	0,0179	0,0929	0,1097
η, град.	−2,82	−3,64	−1,83	−1,03	−5,31	−6,26
cos η	0,9988	0,9980	0,9995	0,9998	0,9957	0,9940
h, град.	6,88	6,17	8,00	8,80	4,45	3,40
cos h	0,9928	0,9942	0,9903	0,9882	0,9970	0,9982
sin $(A-A_0)$	−0,1686	−0,1038	0,0524	0,0887	0,1501	0,1991
$A-A_0$, град.	−9,71	−5,96	3,00	5,09	8,63	11,48
A, град.	160,15	163,92	172,84	174,90	178,45	181,27
A_0, град.	169,86	169,88	169,84	169,81	169,82	169,79
cos $(A-A_0)$	0,9857	0,9946	0,9986	0,9961	0,9887	0,9800
$h-\eta$, град.	9,70	9,81	9,83	9,83	9,76	9,66
h_0, град.	9,84	9,86	9,84	9,87	9,87	9,86

Среднее $h_0=9°,86$, $A_0=169°,85$

нальном изображениях (это может быть любая из сторон кадра или его диагональ).

Формулы для расчета прямоугольных координат узловых точек палетки имеют вид

$$y = F' \cdot \frac{\operatorname{tg} h \cos h_0 - \sin h_0 \cos (A - A_0)}{\operatorname{tg} h \sin h_0 + \cos h_0 \cos (A - A_0)}, \tag{31}$$

$$x = \operatorname{tg}(A - A_0)(F' \cos h_0 - y \sin h_0). \tag{32}$$

Задавая значения h, A через градус и зная F', h_0, A_0, мы без труда найдем x, y для значений h, $A - A_0$, соответствующих целым градусам. Нанеся по значениям x, y точки на

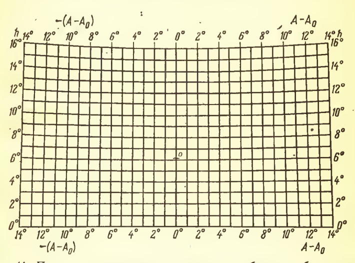


Рис. 41. Палетка для измерения координат серебристых облаков для $F' = 250$ мм и $h_0 = 6°07'$.

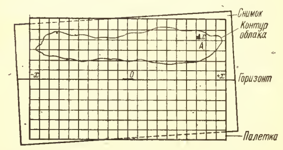


Рис. 42. Наложение палетки на снимок серебристых облаков.

z	S, км
89°00′	982
50′	964
40′	946
30′	926
20′	910
10′	892
88°00′	876
50′	860
40′	844
30′	827
20′	811
10′	798
87°00′	782
50′	768
40′	755
30′	739
20′	721
10′	711
86°00′	700
40′	676
20′	655
85°00′	631
40′	609
20′	590
84°00′	570
30′	545
83°00′	520
30′	497
82°00′	478
30′	456
81°00′	436
30′	419
80°00′	404
30′	389
79°00′	374
78°00′	346
77°00′	324
76°00′	304
75°00′	286
74°00′	270
73°00′	254
72°00′	241
71°00′	228
70°00′	217
65°00′	172
60°00′	140
55°00′	114
50°00′	96
45°00′	82

Рис. 43. Номограмма для определения расстояний.

лист бумаги, соединим их отрезками прямых (из-за малой кривизны дуг нет надобности пользоваться лекалом). Пример такой палетки для $F'=250$ мм и $h_0=6°07'$ представлен на рис. 41.

Теперь мы можем начать измерения. Накладываем палетку на изображение поля серебристых облаков так, чтобы линия горизонта и оптический центр, наколотый иголкой, на изображении совпали с соответствующей линией и точкой на палетке (рис. 42). Затем измеряем координаты h, $A-A_0$ (которые потом переводим в h, A) тех точек поля серебристых облаков, которые мы хотим отобразить на земную поверхность.

Расстояние S от точки наблюдения до проекции точки серебристого облака с учетом рефракции можно вычислить по следующей формуле, выведенной М. И. Буровым:

$$S = 7429\left(-\operatorname{tg} h + \sqrt{\operatorname{tg}^2 h + 0{,}0221}\right), \qquad (33)$$

где S — расстояние в километрах. Еще проще определить это расстояние с помощью номограммы, изображенной на рис. 43. Значения S приведены также в Приложении 3 в конце книги.

Определив S, берем хорошую географическую карту, помечаем на ней пункт наблюдений и откладываем от него расстояние S каждой точки поля серебристых облаков в направлении, соответствующем ее азимуту A (при этом надо помнить, что азимут 180° соответствует направлению на север). Мы получим проекции этих точек на земную поверхность. По отдельным точкам можно восстановить очертания всего облачного поля. Для удобства следует изготовить отпечаток снимка, зеркальный относительно линии горизонта: на этом отпечатке верх и низ поменяются местами, а левая и правая стороны останутся соответственно слева и справа. Такой отпечаток будет передавать общую конфигу-

рацию облачного поля, но с перспективными искажениями. Напомним, что верхние части поля расположены ближе к нам, чем нижние, поэтому мы и рекомендуем изготовить такой зеркальный отпечаток. Кроме того, на нем будет наглядно видна волновая структура облаков (см. рис. 12).

Нанеся на карту положения тех или иных деталей по нескольким последовательным снимкам, измеряем затем по карте их смещения между двумя соседними положениями. Поделив эти смещения на интервалы времени между снимками, получим значения скоростей движения этих деталей.

Впрочем, производить измерения по карте не обязательно — необходимые нам смещения можно вычислить. Пункт наблюдения и оба положения проекции детали серебристого облака образуют сферический треугольник на поверхности земного шара (рис. 44), в котором мы без труда находим две стороны s_1, s_2 (угол между ними $\alpha = A_1 - A_2$ нам известен), зная расстояния S_1, S_2:

$$s_{1,2} = \frac{180}{\pi} \frac{S_{1,2}}{R}. \qquad (34)$$



Рис. 44. Сферический треугольник на поверхности Земли (к определению смещения серебристых облаков).

Здесь $R = 6389$ км — радиус кривизны земной поверхности в широтном поясе, где наблюдаются серебристые облака. Третью сторону треугольника λ найдем по формулам

$$\operatorname{ctg} \beta = \frac{\sin s_1 \operatorname{ctg} s_2 - \cos s_1 \cos \alpha}{\sin \alpha}, \qquad (35)$$

$$\sin \lambda = \frac{\sin s_2 \sin \alpha}{\sin \beta}, \qquad (36)$$

где β — вспомогательный угол, противолежащий стороне s_2. От величины λ — дуги смещения в градусах — делаем переход к смещению L в километрах по формуле

$$L = \frac{\pi \lambda}{180} R. \qquad (37)$$

Поделив L на интервал времени t, получим скорость движения данной детали серебристого облака. Скорости надо свести в таблицу для данной ночи, и если они мало отличаются друг от друга, найти среднюю скорость. Потом надо сопоставить между собой скорости движения для разных ночей, построить график распределения по скоростям.

§ 15. ОПРЕДЕЛЕНИЕ ВЫСОТ СЕРЕБРИСТЫХ ОБЛАКОВ

Определить высоты серебристых облаков можно из одновременных (корреспондирующих) фотографий, полученных с двух концов базиса, длина и ориентировка которого известны. Существует несколько способов определения высот серебристых облаков. Мы здесь изложим сравнительно простой способ, предложенный М. А. Дирикисом и Ю. Л. Францманом.

Введем прямоугольную геоцентрическую систему координат с началом в центре Земли. Ось X направим к точке пересечения экватора с начальным (гринвичским) меридианом, ось Y — к точке экватора с восточной долготой 90°, ось Z — к северному полюсу Земли.

Далее введем две топоцентрические системы координат с началом в каждом из двух пунктов наблюдений. Оси расположим параллельно осям основной геоцентрической системы.

Определенные путем измерения на фотографиях горизонтальные координаты точки облака h, A переводим в экваториальные координаты t, δ по известным формулам

$$\left.\begin{aligned} \sin\delta &= \sin\varphi\sin h - \cos\varphi\cos h\cos A, \\ \cos\delta\sin t &= \cos h\sin A, \\ \cos\delta\cos t &= \sin h\cos\varphi + \cos h\sin\varphi\cos A. \end{aligned}\right\} \quad (38)$$

В формулах (38) φ — широта пункта наблюдения, δ — склонение, t — часовой угол данной точки облака. Далее для сокращения записи там, где формулы одинаковы для обоих пунктов, мы будем писать индекс i $(i=1, 2)$. Топоцентрические координаты точки C облака будут равны

$$\left.\begin{aligned} X_i &= r_i\cos\delta_i\cos t_i, \\ Y_i &= r_i\cos\delta_i\sin t_i, \\ Z_i &= r_i\sin\delta_i, \end{aligned}\right\} \quad (39)$$

где r_i — расстояния до точки C от обоих наблюдательных пунктов по прямой (по лучу зрения). Введем обозначения (для краткости)

$$\left.\begin{aligned} \xi_i &= \cos\delta_i\cos t_i, \\ \eta_i &= \cos\delta_i\sin t_i, \\ \zeta_i &= \sin\delta_i. \end{aligned}\right\} \quad (40)$$

Тогда получим следующую систему из шести уравнений с пятью неизвестными — геоцентрическими координатами

точки C (X_C, Y_C, Z_C) и расстояниями r_1, r_2:

$$\left.\begin{aligned} X_C = X_1 + r_1\xi_1 = X_2 + r_2\xi_2, \\ Y_C = Y_1 + r_1\eta_1 = Y_2 + r_2\eta_2, \\ Z_C = Z_1 + r_1\zeta_1 = Z_2 + r_2\zeta_2. \end{aligned}\right\} \quad (41)$$

Эту систему можно решить методом наименьших квадратов, изложенным в Постоянной части «Астрономического календаря» (7-е изд.— М.: Наука, 1981, с. 521—532). Для тех, кто не знаком с этим методом, можно рекомендовать следующий порядок вычислений.

Отвлечемся на время от левых равенств в системе (41) и от величин X_C, Y_C, Z_C. Тогда у нас останутся три условных уравнения с двумя неизвестными r_1, r_2. Их решение по методу наименьших квадратов дает

$$r_1 = \frac{K_2M_1 + NM_2}{N^2 - K_1K_2}, \quad r_2 = \frac{K_1M_2 + NM_1}{N^2 - K_1K_2}, \quad (42)$$

где введены обозначения

$$\left.\begin{aligned} K_1 &= \xi_1^2 + \eta_1^2 + \zeta_1^2, \\ K_2 &= \xi_2^2 + \eta_2^2 + \zeta_2^2, \\ N &= \xi_1\xi_2 + \eta_1\eta_2 + \zeta_1\zeta_2, \\ M_1 &= \xi_1 (X_1 - X_2) + \eta_1 (Y_1 - Y_2) + \zeta_1 (Z_1 - Z_2), \\ M_2 &= \xi_2 (X_1 - X_2) + \eta_2 (Y_1 - Y_2) + \zeta_2 (Z_1 - Z_2). \end{aligned}\right\} \quad (43)$$

Подставляя r_1, r_2 в уравнения (41), получим значения X_C, Y_C, Z_C. Из двух значений каждой из этих величин (по $i=1$ и $i=2$) берем среднее. Затем находим радиус-вектор точки C относительно центра Земли ρ_C,

$$\rho_C = \sqrt{X_C^2 + Y_C^2 + Z_C^2}, \quad (44)$$

и наконец, высоту точки C серебристого облака

$$H = \rho_C - R, \quad (45)$$

где R — радиус Земли на широте проекции серебристого облака, которую можно найти по формуле

$$\varphi' = \arcsin \frac{Z_C}{\rho_C}; \quad (46)$$

аналогично долгота проекции точки C равна

$$\lambda = \operatorname{arctg} \frac{Y_C}{X_C}. \quad (47)$$

Значения R для данной широты φ приведены в Приложении 4. Там же даны поправки для перевода геоцентрической широты φ' (получаемой из формулы (46)) в географическую широту φ. В среднем для зоны появлений серебристых облаков $\varphi - \varphi' = 10'$.

Таким образом, определение высот серебристых облаков методом Дирикиса — Францмана — операция несложная, но требует выполнения многих измерений и вычислений. Лучше всего эти расчеты производить на ЭВМ. Те кружки или группы наблюдателей серебристых облаков, которые имеют такую возможность (используя ЭВМ астрономических или иных научных учреждений, шефствующих предприятий и т. д.), должны составить программу и заложить в нее результаты измерений по всем фотографиям, полученным с двух пунктов. Формулы элементарны, и поэтому любая ЭВМ выдаст результаты за очень короткий срок.

Тем, кто не имеет такой возможности, придется считать на микрокалькуляторах или с помощью таблиц, что тоже не представляет принципиальных трудностей. Придется, правда, потрудиться, но зато наблюдатели и вычислители будут вознаграждены интересными и ценными результатами, которые они получат.

§ 16. ФОТОМЕТРИЯ, КОЛОРИМЕТРИЯ И ПОЛЯРИМЕТРИЯ СЕРЕБРИСТЫХ ОБЛАКОВ

Исследование оптических свойств серебристых облаков удобнее всего проводить методами фотографической фотометрии и колориметрии. *Колориметрия* — это та же фотометрия, но проводимая через светофильтры. Наконец, по фотографиям, снятым через поляроиды, можно проводить *поляриметрию*. Методика получения и обработки фотографий во всех трех методах одна и та же, поэтому мы будем описывать их параллельно.

Для того чтобы фотографии серебристых облаков были пригодны для фотометрической обработки, они должны быть высокого качества, хорошо проявлены, отфиксированы и промыты. Но этих требований недостаточно. Фотографии, предназначенные для фотометрии, должны быть калиброваны и стандартизованы.

Калибровка фотографий. Чтобы по почернению негатива определить отношение яркостей объекта в различных точках (или разных объектов), нужно получить соотношение между почернением и освещенностью.

Почернение измеряется с помощью микрофотометра по поглощению луча, проходящего в приборе сквозь изображение на негативе и регистрируемого отсчетами на шкале микрофотометра.

Если мы произведем засветки на фотопластинке или пленке при измерении освещенности в геометрической прогрессии, а затем измерим оптические плотности на микрофотометре, то мы сможем построить *характеристическую*

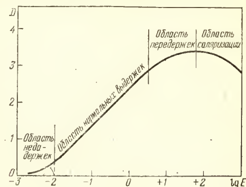


Рис. 45. Характеристическая кривая фотопластинки.

кривую фотоэмульсии, выражающую соотношение между освещенностью E и оптической плотностью почернения D (рис. 45).

Характеристическая кривая состоит из нескольких участков. Начальный участок, где кривая идет полого, называется участком или областью *недодержек*. Следующий участок, где кривая близка к прямой,— это область *нормальных выдержек* (времени экспозиции). Наконец, верхний участок, где наклон кривой снова уменьшается,— область *передержек*.

При фотометрии серебристых облаков нужно стремиться к тому, чтобы изображения облаков оказались в области нормальной экспозиции. С другой стороны, при фотографической фотометрии необходимо все снимки делать с одинаковым временем экспозиции. Поэтому, учитывая многолетний опыт наблюдателей, будем делать все снимки (включая калибровочные и стандартизационные) с временем экспозиции 30 секунд. Чувствительность пленок должна быть 90—130 единиц ГОСТ.

Для калибровки можно использовать трубчатый фотометр, подробно описанный в книге «Солнечное затмение

31 июля 1981 года и его наблюдения» (М.: Наука, 1981). Однако в этот фотометр пленку надо заряжать отдельно, что сопряжено с некоторыми неудобствами. Лучше поэтому для калибровки снимков серебристых облаков использовать рекомендуемый О. Б. Васильевым калибровочный фонарь, который нетрудно сделать самому. Устройство его следующее (рис. 46).

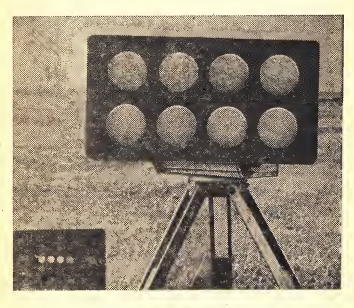


Рис. 46. Калибровочный фонарь.

Нужно сделать прочный и светонепроницаемый ящик из толстой многослойной фанеры длиной 40 см и сечением 20×26 см. Передняя и задняя крышки его должны быть съемными, но прочно соединяться с корпусом. На задней крышке с внутренней стороны укрепляем несколько электроламп так, чтобы они давали равномерное освещение передней рамки, куда вставляется для проверки равномерности освещения матовое стекло 18×24 см.

Возьмем лист плотной черной бумаги или тонкого картона такого же, как и стекло, формата и вырежем в нем 8 круглых отверстий диаметром 3 см. На каждое отверстие наклеим заранее засвеченные и проявленные кусочки пленки (лучше использовать пленку 6×6 см и слегка обрезать ее по краям). Засветку этих пленок надо сделать с време-

нем экспозиции, возрастающим в геометрической прогрессии: 1, 2, 4, 8, 16, 32, 64, 128 секунд. Чтобы засветки не получились в области передержек, источник света надо подобрать достаточно слабый. Можно использовать для этого тот же фонарь, закрытый одним матовым стеклом, а яркость ламп понизить с помощью реостата, включенного последовательно с фонарем. Пленки вставляются в кассеты, устанавливаемые в нескольких метрах от фонаря, крышка кассеты открывается так, чтобы пленка была обращена эмульсией к фонарю, а фонарь включается выключателем на нужное число секунд. После выключения фонаря закрываем крышку кассеты и ставим на ее место другую и т. д. Работа должна производиться в полной темноте, никаких других источников света, кроме фонаря-осветителя, не должно быть. Лучше всего эту часть работы провести ночью.

После проявления, фиксирования, промывки и просушки засвеченные таким образом пленки надо в свою очередь прокалибровать, так как плотности засветок не пропорциональны времени экспозиции. Сделать это можно с помощью фотоэлектрического фотометра, пропуская свет от стандартного источника сквозь наши пленки и замеряя показания фотометра.

После калибровки (результаты которой надо записать в специальную таблицу) пленки, как уже было сказано, наклеиваются на отверстия в листе бумаги или картона, который зажимается между двумя матовыми стеклами 18×24 см, после чего весь этот «слоеный пирог» вставляется в переднюю рамку калибровочного фонаря (только что служившего нам осветителем). Прибор готов.

Добавим еще, что фонарь надо покрасить снаружи черной матовой, а внутри — белой матовой краской.

Фонарь устанавливается в 10—12 м от фотоаппаратов, которыми мы будем вести съемку серебристых облаков, так чтобы он был на 2° выше линии горизонта. Лампы фонаря включаются в сеть или питаются от аккумуляторов. В цепь вводятся реостат, которым можно регулировать яркость ламп, и микроамперметр. Предварительно с помощью движка реостата надо подобрать яркость ламп так, чтобы при фотографировании фонаря самое яркое отверстие уже попадало в область передержек, а самое слабое было недодержано. Это даст нам гарантию, что область нормальных времен экспозиции будет полностью охвачена изображениями 8 отверстий фонаря.

Фонарь включается за 10 минут до начала съемки серебристых облаков и фотографируется одновременно с ними

на тех же кадрах пленки. По окончании работы его выключают. Во время работы надо следить за постоянством силы тока, питающего фонарь. Это делается с помощью микроамперметра и реостата.

Фотометрическая стандартизация. Калибровочная шкала дает нам как бы масштаб шкалы почернений, позволяет перевести отношения плотностей в отношения яркостей. Задача стандартизации — получить нуль-пункт этой шкалы, который позволит нам выразить все яркости в абсолютной шкале. Для этого надо получить на нашей пленке засветку от стандартного источника света, создающего на пленке освещенность, значение которой нам известно.

Таким источником является Солнце. Но свет Солнца очень ярок, и его надо ослабить по крайней мере в миллион раз. Для этого можно использовать рассеивающий или просвечивающий экран. По ряду причин следует предпочесть просвечивающий экран, так как насадку с таким экраном можно направить непосредственно на Солнце, установив ее на тот же аппарат, которым производилась съемка серебристых облаков.

Следуя рекомендациям О. Б. Васильева, можно предложить такое устройство стандартизационной насадки (рис. 47). Она представляет собой трубку, одним концом прочно скрепленную с тубусом объектива фотоаппарата. Внутри трубки поставлен ряд кольцевых диафрагм,

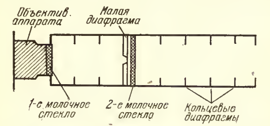


Рис. 47. Устройство стандартизационной насадки.

предназначенных для того, чтобы отсекать боковые лучи (рассеянный свет неба, отражения от стенок трубки). Кроме того, все внутренние поверхности трубки и диафрагм должны быть выкрашены в черный цвет матовой краской.

В трубке укрепляются два просвечивающих экрана из молочных стекол: один непосредственно перед объективом аппарата, другой — в 10 см от него. Вплотную к первому

(считая от открытого конца трубки) экрану ставится малая диафрагма, размер которой мы подберем из опыта.

Внешний экран освещается прямыми лучами Солнца (для этого аппарат с насадкой направляется прямо на Солнце, рис. 48). Освещенный Солнцем, он (точнее, кружок, ограниченный малой диафрагмой) сам становится источником света и освещает внутренний экран. Последний, в свою очередь, посылает свет в объектив фотоаппарата.

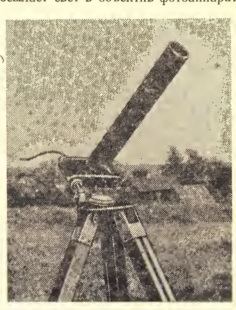


Рис. 48. Фотоаппарат со стандартизационной насадкой.

Чтобы привязать оценки яркости серебристых облаков к засветке от экрана, полученной с помощью описанной насадки, надо знать коэффициент ослабления насадки, т. е. отношение создаваемой ею освещенности к освещенности от прямых лучей Солнца. Сделать это можно в лаборатории, измерив коэффициент пропускания каждого из молочных стекол в отдельности, а затем вычислив общий коэффициент ослабления по формуле

$$K = r_1 r_2 \frac{s}{L^2}, \tag{48}$$

где L — расстояние между экранами, s — площадь малой диафрагмы, r_1, r_2 — коэффициенты пропускания обоих экранов.

При отсутствии фотометрической лабораторной установки можно порекомендовать любителю астрономии следующий метод, основанный на сравнении освещенностей от Солнца и от полной Луны. Идея метода заключается в следующем.

Получаем засветку от Солнца при прохождении его лучей через два экрана, как было описано. Затем во время полнолуния делаем засветку от полной Луны, удалив внешний экран и малую диафрагму. Освещенность объектива аппарата в первом случае равна

$$E_1 = r_1 r_2 \frac{s}{L^2} E_{\odot}, \tag{49}$$

где $E_{\odot}$ — освещенность поверхности, поставленной перпендикулярно солнечным лучам. Во втором случае освещенность объектива будет равна

$$E_2 = r_2 E_{☾}, \tag{50}$$

где $E_{☾}$ — аналогично предыдущему освещенность поверхности, перпендикулярной лунным лучам. Следовательно, коэффициент пропускания первого (внешнего) экрана равен

$$r_1 = \frac{E_1}{E_2} \cdot \frac{E_{☾}}{E_{\odot}} \cdot \frac{L^2}{s}. \tag{51}$$

Поменяв экраны местами и сделав еще такую же пару засветок, найдем r_2. Величина $E_{☾}/E_{\odot}$ в первом приближении (для средних расстояний Солнца и Луны) равна $1{,}8 \cdot 10^{-6}$. Однако нам придется учесть еще и отличие реальных расстояний Солнца и Луны от средних и, что самое главное, поглощение их лучей в атмосфере.

Учет первого фактора не представляет никаких трудностей и производится путем применения формул

$$E_{\odot} = E_{\odot}^0 \left(\frac{\pi_{\odot}}{\pi_{\odot}^0} \right)^2, \quad E_{☾} = E_{☾}^0 \left(\frac{\pi_{☾}}{\pi_{☾}^0} \right)^2, \tag{52}$$

где величины с индексом «0» соответствуют средним расстояниям, а величины без индекса — реальным, буквой π обозначены параллаксы Солнца и Луны, приводимые в астрономических ежегодниках и календарях. Вместо отношения параллаксов можно взять отношение радиусов (диаметров) дисков обоих светил. За средние принимаем следующие значения параллаксов и радиусов дисков

Солнца и Луны:

$$\pi_{\odot}^{0} = 8'',794, \quad \pi_{☾}^{0} = 3422'',54,$$
$$R_{\odot}^{0} = 959'',63 \quad R_{☾}^{0} = 932'',6.$$

Учет атмосферного поглощения требует постановки специальных наблюдений, которые будут описаны ниже. Для того чтобы свести к минимуму возможные ошибки, нужно брать засветки от Солнца и Луны при одинаковой (и как можно большей) высоте обоих светил над горизонтом. Для этого наблюдать надо в полнолуние, приходящееся на весну (вторая половина марта или апрель) или осень (сентябрь — начало октября), ибо в это время склонения Солнца и полной Луны не очень сильно отличаются друг от друга и можно подобрать моменты, когда каждое из светил будет на заданной высоте, например, 30°. Наблюдаемая освещенность от Солнца (с учетом атмосферного ослабления) будет равна

$$E_{\odot н} = E_{\odot} p^{M(z)}, \qquad (53)$$

где p — коэффициент прозрачности атмосферы, определяемый из специальных наблюдений, $M(z)$ — атмосферная масса (отношение масс воздуха, проходимых наклонным и вертикальным лучами), для не очень больших z равная sec z. Методика определения p будет описана ниже.

Яркости, имеющие фотометрическую привязку к засветке, полученной от просвечивающего экрана, освещенного лучами Солнца, будут выражены в так называемых *абсолютных солнечных единицах* (а. с. е.). Нужно помнить, что 1 а. с. е. $= 2 \cdot 10^5$ стильбов.

Яркость точки поля серебристых облаков в а. с. е. выразится формулой

$$B_{н} = K \frac{b}{b_{э}} \left(\frac{\pi_1}{\pi_2}\right)^2, \qquad (54)$$

где K — определенный нами коэффициент ослабления насадки, b — яркость данной точки поля в условной системе единиц калибровочной шкалы, $b_{э}$ — яркость просвечивающего экрана насадки, расположенного перпендикулярно солнечным лучам за пределами земной атмосферы, в той же системе единиц, π_1 и π_2 — параллаксы Солнца в моменты наблюдения Солнца и серебристых облаков соответственно. В этой формуле подразумевается, что и серебристые облака, и засветка от экрана, освещенного Солнцем, фотографировались с одним и тем же временем экспозиции. Для такой

стандартной и постоянной при всех фотометрических работах длительности экспозиции рекомендуется выдержка в 30 секунд.

Однако полученная нами засветка от экрана насадки соответствует не яркости $b_э$, а яркости $b'_э$, искаженной поглощением солнечных лучей в земной атмосфере. В соответствии с формулой (53) можно написать

$$b_э = b'_э p^{M(z)}. \qquad (55)$$

Поглощение в атмосфере сильно ослабляет и видимую яркость серебристых облаков. К вопросам определения p и $M(z)$ мы сейчас и перейдем.

Учет ослабления света атмосферой. Хотя выше мы не раз говорили о поглощении света Солнца, серебристых облаков и других светил атмосферой, этот термин не совсем точен. Свет Солнца не столько поглощается, сколько рассеивается молекулами и атомами атмосферы, иначе говоря, прямой луч света, испытав взаимодействие с молекулой или атомом воздуха, изменяет свое направление и как бы выбывает из состава прямых солнечных лучей. Лучи, испытавшие акт рассеяния (часть лучей рассеивается многократно), формируют рассеянный свет неба — так радующий наш глаз голубой цвет дневного неба, а также все оттенки сумерек. Цвет неба определяется тем свойством рассеяния, что коэффициент рассеяния обратно пропорционален четвертой степени длины волны излучения (закон Рэлея). Поэтому лучи коротких длин волн (фиолетовые, синие, голубые) рассеиваются сильнее, чем более длинноволновые (желтые, оранжевые, красные). По той же причине Солнце, Луна и другие светила у горизонта кажутся красными — красный свет меньше всего рассеивается атмосферой.

Кроме рассеяния, лучи Солнца и других светил испытывают в атмосфере и *истинное поглощение*, т. е. поглощаются, передавая атому или молекуле свою энергию. Эта энергия расходуется на нагревание, возбуждение, диссоциацию и ионизацию атомов и молекул воздуха, о чем уже было рассказано в § 2. Но роль истинного поглощения в ослаблении потока видимых лучей мала сравнительно с ролью рассеяния. Мы будем говорить об *ослаблении* света атмосферой, имея в виду суммарное действие обоих процессов и избегая применяемого в науке термина *экстинкция*.

Состояние атмосферы в данный момент в данном пункте наблюдений характеризуется *коэффициентом прозрачности p*. Эта величина представляет собой отношение яркос-

ти светила, находящегося в зените и наблюдаемого сквозь атмосферу, к яркости того же светила за пределами атмосферы. Казалось бы, определить коэффициент прозрачности невозможно, не производя одновременных замеров яркости светила с поверхности Земли (притом в той ее точке, где это светило находится в зените) и из ближнего космоса. Однако это не так, и определить величину p можно за несколько часов наблюдений с данного места, причем наблюдать светило выгоднее не в зените, а на небольших высотах. Дело в том, что согласно закону Бугера ослабление света, идущего под углом z к вертикальному направлению, равно

$$T_z = p^{\sec z}. \qquad (56)$$

Закон Бугера справедлив для не слишком больших z, а именно, для $z \leqslant 75^\circ$. Для бо́льших z мы должны в формуле (56) писать уже не $\sec z$, а $M(z)$, где $M(z)$ называется относительной воздушной массой, или функцией Бемпорада. Существуют таблицы $M(z)$ для больших z *), однако они вычислены для так называемой средней атмосферы, а истинные $M(z)$ сильно зависят от состояния атмосферы в данном месте и в данный момент (от ее температуры, запыленности и т. д.). Поэтому лучше определять $M(z)$ непосредственно из наблюдений. Техника этих наблюдений такова.

Во вторую половину дня, предшествующего ночи наблюдений, направляем нашу стандартизационную насадку на Солнце и каждые 15 минут делаем засветку на пленке со стандартным временем экспозиции 30 секунд. Эти наблюдения продолжаются до самого захода Солнца, пока виден весь солнечный диск. Если ночью наблюдались серебристые облака, то утром наблюдения прозрачности атмосферы повторяются от восхода Солнца до полудня (ближе к полудню наблюдения можно производить реже, раз в полчаса).

Понятно, что такая нагрузка не под силу одному наблюдателю. Чтобы успешно работать, наблюдатель должен быть бодрым, а для этого надо хорошо высыпаться. Поэтому фотометрические наблюдения должны производиться двумя группами наблюдателей. Группа № 1 («совы») наблюдает с вечера до утра (или до исчезновения серебристых облаков), после чего ложится спать. Группа № 2 («жаворонки») ведет наблюдения атмосферной прозрачности днем до вечера, а затем идет спать до восхода Солнца, после чего проводит второй цикл наблюдений прозрачности — от восхода Солн-

*) См. табл. 20 в «Постоянной части Астрономического календаря» (7-е изд.), а также Приложение 5.

ца до полудня (можно закончить его и раньше). Чтобы каждый смог понаблюдать серебристые облака, «совы» и «жаворонки» через сутки могут меняться ролями.

Рассмотрим теперь порядок обработки полученного ряда наблюдений. Все засветки измеряем на микрофотометре и выражаем в системе единиц калибровочной шкалы. Не следует забывать, что каждая пленка с засветками от стандартизационной насадки должна быть прокалибрована, т. е. в нее следует ночью впечатать изображения калибровочного фонаря. Если есть трубчатый фотометр, можно прокалибровать пленку и днем, используя Солнце в качестве осветителя. Поскольку и здесь время экспозиции должно быть равно 30 секундам, внешние отверстия фотометра следует прикрыть толстым молочным стеклом. Если применяются два разных калибровочных устройства, их шкалы надо привязать друг к другу по засветкам на одной и той же пленке обеих шкал.

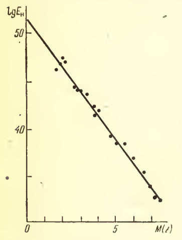


Рис. 49. Бугеровский график.

Возьмем теперь формулу (53), подставим в нее $E_{\odot}$ из формулы (52) и прологарифмируем. Вместо $E_{\odot}^{0}$ для краткости будем писать E_0. Получим

$$\lg E_{\text{н}} = \lg E_0 + 2 \lg \frac{\pi_{\odot}}{\pi_{\odot}^{0}} + M(z) \lg p. \quad (57)$$

Нанесем теперь все точки на график, откладывая по оси абсцисс значения $M(z)$, а по оси ординат — значения $(\lg E_{\text{н}} - C)$, где

$$C = \lg E_0 + 2 \lg \frac{\pi_{\odot}}{\pi_{\odot}^{0}}. \quad (58)$$

Большинство точек для $z \leqslant 75°$ ляжет на прямую (рис. 49), тангенс угла наклона которой к оси абсцисс будет равен $\lg p$. Проведя эту прямую до пересечения с осью ординат, найдем на ней значение C, а по формуле (58) $\lg E_0$.

Для того чтобы определить и нанести на график значения $M(z)$, нужно будет вычислить зенитные расстояния Солнца для всех моментов наблюдений. Это делается по

известной формуле

$$\cos z = \sin \varphi \sin \delta + \cos \varphi \cos \delta \cos t, \qquad (59)$$

где φ — широта места, δ — склонение Солнца, t — его часовой угол; значение t в градусах равно

$$t = 15\,(T - T_0), \qquad (60)$$

где T — момент наблюдения в часах, T_0 — момент истинного полудня (верхней кульминации Солнца). Этот момент в свою очередь равен

$$T_0 = 12^{ч} + (\lambda_0 - \lambda) + \eta, \qquad (61)$$

где λ — долгота места в единицах времени, λ_0 — долгота центрального меридиана пояса, по которому ведется счет времени в месте наблюдений, η — поправка на приведение среднего времени к истинному, равная *уравнению времени*, которое приводится в таблицах эфемерид Солнца в «Астрономическом календаре» на каждый год. Из тех же таблиц берем и δ. Значение λ_0 берем, исходя из следующих соображений. Поскольку период наблюдений серебристых облаков приходится на период действия в нашей стране *летнего времени*, то $\lambda_0 = 4$ часа $+ \Delta T$, где ΔT — разность местного декретного времени с московским, а 4 часа — разность московского летнего времени с всемирным.

Исправлять за ослабление света в атмосфере нужно и яркость самих серебристых облаков. Так как они наблюдаются, как правило, при $z > 75°$, при учете ослабления их света в атмосфере нельзя принимать $M(z) = \sec z$, а надо использовать значения $M(z)$, полученные из описанных выше наблюдений Солнца в ближайший вечер или утро.

Переход от наблюденной яркости серебристых облаков к исправленной за атмосферное ослабление производится по формуле

$$B_0 = B_н p^{-M(z)}. \qquad (62)$$

Для определения таких характеристик серебристых облаков, как а л ь б е д о, нужно учитывать еще и атмосферное ослабление лучей Солнца, освещающих серебристые облака (см. § 5, формула (12)). Если величина T_2 в этой формуле нам теперь известна из наблюдений Солнца и равна

$$T_2 = p^{M(z)}, \qquad (63)$$

то стоящая в той же формуле величина T_1 (прозрачность атмосферы на пути Солнце — облако) не может быть опреде-

лена непосредственно из наблюдений и ее нужно уметь рассчитывать.

Световой поток, идущий от Солнца и освещающий серебристые облака, испытывает ослабление не только вследствие рассеяния и поглощения, но и вследствие рефракционного расхождения лучей. Это явление связано с тем, что чем ниже в земной атмосфере проходит луч, тем сильнее он преломляется (рис. 50), и сечение пучка лучей dS расширяется, превращаясь в $dS' > dS$. Соответственно убывает поток

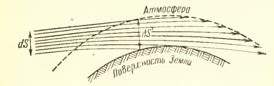


Рис. 50. Схема рефракционного ослабления луча, проходящего через атмосферу Земли.

излучения, приходящийся на единицу поверхности, перпендикулярной пучку, т. е. освещенность. Нетрудно показать, что отношение освещенности при отсутствии рефракции E к освещенности E', искаженной рефракцией, равно *)

$$\frac{E}{E'} = 1 + \frac{L}{H_*}\vartheta, \qquad (64)$$

где H_* — шкала высот (см. формулу (2) на с. 16), L — расстояние BC на рис. 18, равное

$$L = (R + H)\cos(z_\odot - \psi_1), \qquad (65)$$

а угол ψ_1 определяется формулой (5), § 3; ϑ — это удвоенный угол рефракции, величина которого зависит от значения минимальной высоты H_0, которой достигает освещающий серебристое облако луч Солнца. Эта высота определяется по формуле

$$H_0 = (R + H)\sin(z_\odot - \psi_1) - R. \qquad (66)$$

Значения угла ϑ в функции H_0 приведены в Приложении 6.

Нам осталось учесть ослабление освещающего солнечного луча за счет рассеяния и поглощения в атмосфере на пути

*) Вывод формулы (64) приведен в книгах: *Шаронов В. В.* Природа планет.— М.: Физматгиз, 1958, с. 414—415; *Шаронов В. В.* Планета Венера.— М.: Наука, 1965, с. 201.

«Солнце — облако», и мы получим следующее выражение для T_1:

$$T_1 = \frac{E'}{E} p^{2M_{90}(H_0)}. \qquad (67)$$

Значения $M_{90}(H_0)$ — воздушной массы, проходимой лучом на минимальной высоте H_0 при $z=90^\circ$, приведены в Приложении 6. Кроме того, ее можно рассчитать по формуле Лапласа

$$M_{90}(H_0) = 36{,}96 \frac{P(H_0)}{1000} \cdot \frac{273}{T-10}, \qquad (68)$$

где P — давление на высоте H_0 в миллибарах, T — температура на той же высоте в градусах абсолютной шкалы Кельвина.

Теперь мы имеем все необходимые величины для учета атмосферного ослабления как света Солнца, к которому мы привязываем с помощью стандартизации яркость серебристых облаков, так и света самих серебристых облаков, а также освещающих их лучей Солнца. Порядок вычислений будем применять следующий:

1) Из обработки лабораторных экспериментов по формулам (51) и (48) определяем раз и навсегда коэффициент пропускания насадки K.

2) Из ряда наблюдений Солнца со стандартизационной насадкой по формулам (57) и (58) строим бугеровский график и определяем прозрачность атмосферы p. Этот же график послужит нам для определения значений $M(z)$ для больших z.

3) По формулам (54) и (55) получаем для каждого отсчета микрофотометра, переведенного в относительные яркости b, видимые абсолютные яркости серебристых облаков $B_н$.

4) По формуле (62) находим истинные яркости серебристых облаков B_0.

5) По формулам (63), (67) и (12) вычисляем видимое альбедо серебристых облаков $A_в$.

Входящие в эти формулы вспомогательные величины находим по другим формулам этого параграфа.

Обращаем внимание читателей на то, что величина $M(z)$ в формулах (53), (55), (57) — это атмосферная масса на пути луча Солнца, фотографируемого нашей насадкой, а в формулах (62) и (63) эта величина соответствует атмосферной массе на пути луча «серебристое облако — наблюдатель», поэтому в эти формулы надо подставлять $M(z)$, соответствую-

щее зенитному расстоянию Солнца в первом случае и серебристых облаков во втором.

Колориметрические наблюдения. Научившись производить фотометрию серебристых облаков по их фотографиям, мы можем перейти к более сложному виду наблюдений — фотографической колориметрии. Вся методика работы остается прежней, но фотографирование ведется одновременно тремя фотоаппаратами, установленными так, чтобы их оптические оси были параллельны друг другу. На объективы аппаратов ставятся три светофильтра, по возможности с узкой полосой пропускания (не более 300 Å), с максимумами чувствительности в синей, желто-зеленой и красной областях спектра. Нужно, чтобы применяемая фотопленка была достаточно чувствительна во всех этих областях спектра, поэтому следует применять пленку типа изохром или изопанхром.

Как уже было сказано, экспозиции на всех трех аппаратах производятся одновременно, для чего применяется устройство, изображенное на рис. 38.

Калибровка каждой пленки производится, как и при одноцветной фотометрии, по изображениям отверстий калибровочного фонаря. Для каждого цвета строится отдельная характеристическая кривая.

Стандартизация снимков для каждого цвета производится отдельно, одной насадкой, но с заменой светофильтров. Это значительно усложняет работу, так как для замены светофильтров насадку надо каждый раз снимать, а потом снова устанавливать. От этого можно избавиться, изготовив три отдельные насадки. В этом случае можно стандартизационные экспозиции производить одновременно тем же устройством. Но тогда нужно произвести фотометрическую привязку всех трех насадок друг к другу. Для этого надо снять светофильтры с аппаратов и получить засветки от Солнца одновременно тремя насадками, а затем произвести их фотометрическое сравнение, хотя бы в относительных единицах. В случае использования трех насадок их надо «закрепить» за аппаратами, т. е. ставить всегда насадку № 1 на аппарат № 1 и т. д. Это нужно еще и потому, что фотоаппараты могут слегка отличаться друг от друга (по фокусному расстоянию, относительному отверстию и т. д.) и описанное выше фотометрическое сравнение будет сделано для постоянно используемых комбинаций «аппарат + насадка».

После получения результатов, т. е. видимых яркостей серебристых облаков в трех областях спектра, можно опре-

делить их специальные показатели цвета в звездных величинах, как это принято в астрономии. Для этого рассчитаем величины

$$\left.\begin{aligned} m_1 &= -2{,}5 \lg B_1, \\ m_2 &= -2{,}5 \lg B_2, \\ m_3 &= -2{,}5 \lg B_3 \end{aligned}\right\} \qquad (69)$$

и образуем разности $m_1—m_2$ и $m_2—m_3$. Это и будут специальные показатели цвета. Индекс «1» здесь относится к красным лучам, «2» — к желто-зеленым, «3» — к синим. Если специальные показатели цвета положительны, значит, свет серебристых облаков краснее света Солнца, если отрицательны — то голубее.

Многие любители астрономии не раз получали цветные фотографии серебристых облаков, чаще всего на обратимой пленке для применения их в качестве слайдов. Получают цветные снимки и на фотобумаге. Однако такие снимки имеют лишь чисто иллюстративное значение, хотя порой и очень красивы. Научная обработка цветных фотографий пока еще не освоепа, ибо при этом значительно усложняется процесс и методика калибровки снимков (нужно получить не только яркостную, но и цветовую шкалу), а также их лабораторной обработки.

Поляриметрия серебристых облаков. Поляриметрия по методике во многом напоминает колориметрию, только вместо цветных светофильтров на объективы фотоаппаратов ставятся анализаторы, в качестве которых могут быть использованы выпускаемые нашей промышленностью и имеющиеся в продаже поляризационные светофильтры (поляроиды). На первый аппарат поляроид ставится так, чтобы плоскость его поляризации была

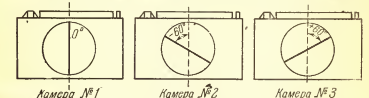


Рис. 51. Схема расположения поляроидов на трех аппаратах.

вертикальна; плоскости поляризации поляроидов на втором и третьем аппарате должны быть наклонены на угол 60° в противоположные стороны (рис. 51). Экспозиции производятся одновременно на всех трех аппаратах.

Нужно помнить, что малейшее различие в пропускании оптики фотоаппаратов может привести к появлению ложной поляризации. То же самое может получиться при различии в чувствительности фотопленок или в режиме их проявления. Чтобы избежать этого, нужно всеми тремя аппаратами снимать *миру*, в качестве которой можно использовать калибровочный фонарь. Свет миры должен быть обязательно естественным, поэтому перед работой нужно проверить, не создает ли просвечивающий экран миры поляризации. Для этого нужно фотографировать миру одним аппаратом при трех положениях поляроида, с поворотом на 60°. Главное здесь — соблюдение равенства экспозиций. Если при трех положениях поляроида засветки от миры будут совершенно одинаковой плотности, ее свет естественный.

Пусть яркости миры (при использовании калибровочного фонаря измеряется яркость отверстия, дающего засветку средней плотности) на каждом из трех снимков с поляроидами равны B_1, B_2, B_3. Пусть далее имеет место следующее соотношение между ними:

$$k_1 B_1 = k_2 B_2 = B_3. \qquad (70)$$

Коэффициенты k_1, k_2, мало отличающиеся от единицы, определяются из снимков миры, после чего все яркости, полученные по фотографиям с первым аппаратом, умножаются на k_1, а со вторым аппаратом — на k_2.

Из яркости серебристых облаков вычитается яркость прилегающих участков сумеречного неба. Только после этого мы получим истинную яркость серебристых облаков. Пусть для трех аппаратов эти яркости будут I_1, I_2, I_3 (мы не используем здесь букву B, чтобы не спутать яркость серебристых облаков с яркостями миры). Степень поляризации p и угол положения плоскости поляризации φ определяются по формулам В. Г. Фесенкова:

$$p = \frac{2\sqrt{I_1(I_1 - I_2) + I_2(I_2 - I_3) + I_3(I_3 - I_1)}}{I_1 + I_2 + I_3}, \qquad (71)$$

$$\operatorname{tg} 2(\varphi - \varphi_1) = \sqrt{3}\,\frac{I_2 - I_3}{2I_1 - I_2 - I_3}, \qquad (72)$$

где φ_1 — угол положения плоскости пропускания поляроида на первом аппарате (если она вертикальна, как на рис. 50, то $\varphi_1 = 0$).

Для измерений поляризации выбирают наиболее характерные детали серебристых облаков, легко отождествимые на всех трех снимках. Сдвиг измеряемой точки на одном

снимке по отношению к другому может привести к появлению ложной поляризации или к искажению результата.

Значения степени поляризации p интересно нанести на график в функции угла рассеяния β, который равен

$$\beta = h - h_{\odot}, \tag{73}$$

где h — высота точки поля серебристых облаков, $h_{\odot}$ — высота Солнца ($h_{\odot} < 0$). Такой график $p(\beta)$ может быть использован для заключения о размерах частиц, из которых состоят серебристые облака.

§ 17. ПРИМЕНЕНИЕ МЕТОДА ЭКВИДЕНСИТ

Обработка фотографий серебристых облаков классическими методами фотографической фотометрии, подробно описанными в предыдущем параграфе, требует большой затраты времени. Этот недостаток свойствен и фотометрии любых других астрономических объектов.

Такое положение заставило астрономов искать иные, более быстрые методы фотометрической обработки фотографий. В середине 60-х годов распространение получил так называемый *метод эквиденсит*, когда линии равной плотности — эквиденситы — на фотографии того или иного небесного объекта получаются путем некоторого сложного фотографического процесса, основанного на *эффекте Сабатье*.

Этот эффект был открыт в 1850 г., на заре развития фотографии, французским ученым П. Сабатье и состоит в следующем. Если после съемки и частичного (неполного) проявления пластинки подвергнуть светочувствительный слой равномерной засветке актиничным (т. е. действующим на данную эмульсию) светом по всей поверхности пластинки, а после этого довести проявление до конца, на фотографии образуется частично, а иногда и полностью обращенное позитивное изображение. Причиной этого является отчасти экранирование оставшихся невосстановленными после первого проявления кристаллов галоидного серебра зернами серебра первоначального (негативного) изображения, отчасти десенсибилизация (понижение чувствительности) этих кристаллов продуктами окисления проявителя. То и другое после равномерной засветки слоя приводит к возникновению в местах расположения зерен негативного изображения вторичного (позитивного) изображения.

Фотографический метод эквиденситометрии основан на использовании происходящего в результате эффекта Саба-

тье наложения негативного и позитивного изображений одного и того же объекта. При печатании с этой комбинации контрастного позитива на нем появляются линии равной оптической плотности почернения — эквиденситы.

Практически поступают так. Оригинальные негативы проявляют обычным образом, как было описано в § 12; после просушки с этих негативов делают контактным способом контратипы, которые и подвергаются процедуре, кратко описанной выше. Контратипирование производится на контрастные пластинки FU-5 (если их нет в распоряжении, то на самые контрастные, какие можно достать). Время выдержки при первой экспозиции (при контратипировании) подбирается так, чтобы после первого проявления изображение самых ярких частей облаков оставалось сильно недодержанным. Тогда после второй засветки (равномерным светом) и второго проявления мы получим эквиденситы для самых слабых участков серебристых облаков, поскольку их изображение при пересъемке на контрастный позитив придется на прямолинейную часть характеристической кривой.

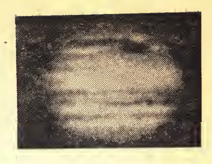
Для получения эквиденсит более ярких частей облачного поля увеличиваем длительность первой выдержки вдвое, переводя позитивное изображение ярких облаков из области недодержек в область нормальной экспозиции. Длительности обеих стадий проявления и второй экспозиции оставляем постоянными (рекомендуемые длительности будут приведены ниже).

Таким образом, мы будем иметь две системы эквиденсит I порядка: одну для более слабых, а другую для более ярких частей облачного поля. (В ходе дальнейшей обработки они объединяются.) При большом перепаде яркостей в облачном поле может потребоваться и третья система эквиденсит, т. е. процесс их получения повторяется трижды.

Поскольку ширина эквиденсит I порядка может быть слишком велика (это зависит от распределения яркостей и контрастов в облачном поле, а также от условий проведения самой эквиденситометрии), процесс контратипирования может быть повторен. При этом получаются эквиденситы II порядка, представляющие собой парные линии, соответствующие геометрическим местам точек равной оптической плотности по обе стороны эквиденситы I порядка. Дальше, если надо, получают таким же путем эквиденситы III порядка.

Для иллюстрации метода на рис. 52 приводим системы эквиденсит, полученные по фотографии планеты Юпитер

Рис. 52. Эквиденситы Юпитера, полученные по фотографии 13—14 марта 1968 г. (вверху) в Астрофизическом институте АН КазССР: *A*, *B*, *C*, *D* — последовательные стадии контратипирования (с ростом первой экспозиции), *1*, *2*, *3* — эквиденситы I, II, III порядков.



13—14 марта 1968 г. в Астрофизическом институте Академии наук Казахской ССР. Буквами *A*, *B*, *C*, *D* обозначены последовательные изображения по мере увеличения первой выдержки (в случае Юпитера пришлось проводить контратипирование 4 раза). Цифры *1*, *2*, *3* соответствуют эквиденситам I, II, III порядка.

Как и в случае обычной фотографической фотометрии, описываемый метод требует проведения калибровки.

Для этого удобнее всего впечатывать на первую эквиденситограмму специальный непрерывный фотометрический клин на пленке или пластинке, который кладется рядом с негативом или накладывается на незасвеченный участок последнего (таковым практически является часть негатива с изображением земной поверхности). Эквиденситы клина обычно имеют форму цепных линий, поэтому измеряют положения эквиденсит вдоль оси симметрии этих фигур.

Непрерывный фотометрический клин нетрудно изготовить самому с помощью приспособления, описанного М. Е. Набоковым и изображенного на рис. 53. Это — свето-

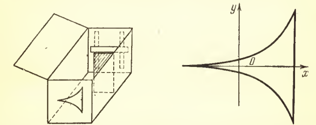


Рис. 53. Ящик Кинга — устройство для изготовления фотометрического клина (по М. Е. Набокову). Справа — форма кривой выреза.

непроницаемый ящик, имеющий на передней торцевой стенке треугольную прорезь, ограниченную с боков двумя симметричными показательными кривыми (экспонентами). Форма этих кривых определяется уравнением

$$y = \pm a^x, \qquad (74)$$

где x, y — прямоугольные координаты точки на кривой, отсчитываемые от точки, расположенной на середине оси прорези (на рис. 53 справа — точка O), a — основание экспоненты, в качестве которого удобно выбрать число $10^{0,1} \approx 1,26$. Тогда форма кривой будет близка к изображенной на рис. 53.

Вырез в передней стенке делается в тонком картоне, который укрепляется на более твердое (например, фанерное) основание. В этом основании тоже делается вырез, но в виде обычного треугольника, более широкого, чем вырез в картоне.

Задняя стенка ящика имеет рамку для вставки кассеты с пластинкой. Точно посередине ящика вставляется вертикальная ширма, закрывающая ровно половину ящика. Все внутренние поверхности в ящике должны быть зачернены, а прорезь в передней стенке прикрыта матовым стеклом.

Экспозиции при изготовлении фотометрического клина подбираем опытным путем. Очевидно, что разные участки пластинки из-за наличия ширмы в середине ящика будут получать разную освещенность: левый (если смотреть со стороны прорези) край пластинки будет освещен всем отверстием, правый — только самой узкой его частью. Освещенность будет пропорциональна площади освещающей поверхности или при данной форме кривой величине $10^{0,1x}$. Отношение освещенностей для двух точек клина с координатами x_1 и x_2 будет равно

$$\frac{E(x_1)}{E(x_2)} = 10^{0,1(x_1 - x_2)}, \qquad (75)$$

а в шкале звездных величин *)

$$m(x_1) - m(x_2) = 0,25\,(x_1 - x_2), \qquad (76)$$

т. е. разность звездных величин некоего источника света, наблюдаемого сквозь наш клин в точках x_1 и x_2, пропорциональна расстоянию между этими точками. За единицу при этом принимается величина $y(0)$ в формуле (74).

Чтобы не засвечивать сразу всю пластинку, можно сделать в задней стенке узкую горизонтальную прорезь шириной 1 см и поставить два зажима, прижимающих кассету с пластинкой вплотную к этой прорези. Тогда из одной пластинки можно будет сделать несколько клиньев. Пластинки для этой цели надо брать низкой чувствительности. По окончании работы пластинка разрезается на отдельные полосы-клинья алмазом или стеклорезом, каждая из них

---

*) Напомним, что шкала звездных величин — логарифмическая: разность звездных величин пропорциональна логарифму отношения блеска с коэффициентом пропорциональности 2,5. Заменяя блеск освещенностью, мы можем распространить эту шкалу и на протяженные объекты.

прикрывается со стороны эмульсии такой же полоской чистого стекла, и клин оклеивается по краям бумагой.

Вернемся к процессу эквиденситометрии. В качестве проявителя для пластинок с эквиденситограммами И. И. Брейдо рекомендует парааминофеноловый проявитель следующего состава:

парааминофенол	7 г,
сульфит безводный	50 г,
сода безводная	50 г,
вода	до 1 л.

Этот проявитель был найден лучшим для данной цели из 9 исследованных составов. Температура проявителя должна быть 20°С. Время первого проявления 45 секунд, после чего пластинку, не погружая в фиксаж, промывают в течение 1 минуты в проточной воде и подвергают в течение 10 секунд второй засветке равномерным освещением при освещенности в 30 люкс (примерно такую освещенность дает 40-ваттная электрическая лампочка на расстоянии 1 м). Пластинка при этом лежит в кювете с водой (надо позаботиться, чтобы вода после укладывания пластинки в кювету совершенно успокоилась). Второе проявление (после второй засветки) продолжается 2 минуты, после чего пластинку на 10 минут погружают в фиксаж, а затем в течение 20 минут промывают в проточной воде и высушивают.

При получении эквиденсит II порядка длительность первой засветки берется 140 секунд, а второй —20 секунд. Весь остальной режим остается прежним. Так же поступаем при получении эквиденсит III порядка.

Но вот, наконец, все эквиденситы получены и пора приступать к построению изофот. Строить их можно как по эквиденситам II, так и III порядка. Этот процесс состоит из двух частей: перевода эквиденсит с негатива на бумагу и определения относительных или абсолютных яркостей, соответствующих каждой эквиденсите.

Первая часть работы особых пояснений не требует. Строить изофоты можно как в масштабе 1:1, так и с увеличением. В последнем случае используем проекционный фонарь для стеклянных (8,5×8,5 см) диапозитивов или иное проекционное устройство, проектируем изображение на лист белой бумаги, следя, чтобы не было искажений изображения (например, из-за наклона луча к плоскости экрана), и обводим эквиденситы карандашом (во избежание ошибок вначале лучше это делать именно карандашом, а потом уже обводить тушью или чернилами). Для удобства работы лист бумаги лучше положить на стол, а проек-

тор установить сверху. Чтобы бумага не сдвигалась, ее надо укрепить кнопками или липкой лентой.

Если для получения эквиденсит I порядка использовались (как это обычно делается) 2—3 негатива, то последовательно переводим на один лист бумаги эквиденситы II и III порядков, соответствующие каждому из них. Надо только позаботиться, чтобы все они имели одинаковую ориентацию, что достигается различными способами (совмещение краев пластинок при контратипировании, впечатывание специальных меток и т. д.).

Вторая часть работы состоит в том, что для каждой эквиденситы мы должны определить соответствующее ей значение относительной или абсолютной яркости. Проще определить относительные яркости. Для этого используем эквиденситы впечатанного рядом с изображением серебристых облаков фотометрического клина, о чем уже говорилось выше. Предварительно клин должен быть проградуирован на микрофотометре и построена градуировочная кривая, связывающая линейные отсчеты на шкале клина (если клин самодельный, такую шкалу нетрудно нанести тушью на стекло или на бумагу, которой оклеен клин) с

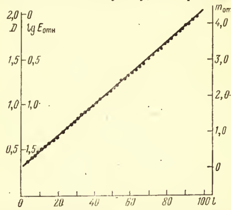


Рис. 54. Градуировочная кривая фотометрического клина (по И. И. Брейдо): l — отсчеты шкалы клина, D — его плотность, $E_{отн}$ и $m_{отн}$— относительная яркость в обычной шкале и в шкале звездных величин.

относительной яркостью, которую можно принять равной коэффициенту пропускания клина в данной точке. Этот коэффициент для многих точек клина (лежащих на его оси) определяем лабораторным путем, как описывалось в § 16, и строим градуировочную кривую. Если клин хорош, она будет близка к прямой (рис. 54).

Измеряем на оси клина по его шкале положения эквиденсит и по градуировочной кривой переводим их в относительные яркости. Теперь каждой эквиденсите можно приписать определенное значение относительной яркости и тем самым превратить их в изофоты, построенные в относительных единицах.

Чтобы получить значения яркостей в абсолютных единицах, надо определить абсолютную яркость хотя бы для одной точки, лежащей на одной из изофот. Это делается методом, подробно описанным в § 16. Сочетание абсолютной фотометрии с эквиденситометрией может привести к большой экономии времени, поскольку полная операция обработки снимка методом эквиденситометрии занимает около четырех часов, тогда как обработка того же снимка обычным фотометрическим путем потребует многих дней, кроме того, для нее нужен микрофотометр, а в описанном методе он не нужен. Да и абсолютное определение яркости потребуется в одной-двух точках.

В настоящее время разработаны и изготовлены электронные устройства, позволяющие непосредственно получать эквиденситы, без фотографического процесса. Одним из них является автономный комплекс обработки изображений Вычислительного центра Сибирского отделения АН СССР. Комплекс позволяет очень быстро (за несколько минут) получать эквиденситы изображений астрономических объектов и серебристых облаков. Вдобавок промежутки между эквиденситами на экране дисплея прибора получаются цветными. Вся картина напоминает физическую карту местности, где разными цветами обозначены разные интервалы уровней высот на суше и глубин в океане. В сущности весь метод эквиденсит напоминает по идее построение такой карты, только роль высот играют яркости.

Представим себе объемное изображение поля серебристых облаков (или любого другого светящегося объекта), где поверхность приподнята на высоту, пропорциональную яркости облаков в данной точке. Мы получим некоторый «фоторельеф». Распилим его теперь воображаемой пилой параллельно горизонтальной плоскости на некоторой высоте, ближе к основанию. Очертания кромки спила дадут нам эквиденситу для наиболее слабых частей облачного поля. Сделаем теперь новый спил на уровне повыше — получим еще одну эквиденситу, для более ярких частей, и т. д.

Автоматический комплекс СО АН СССР действует по принципу цветового разделения различных оптических

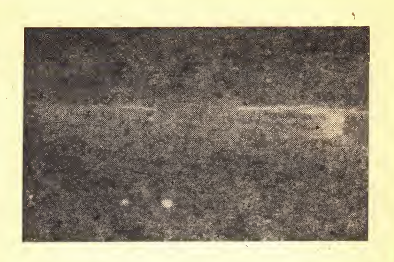




Рис. 55. Фотография серебристых облаков 23—24 июня 1978 г. и ее эквиденситограмма, полученные астрономическим кружком Клуба юных техников СО АН СССР под руководством В. И. Кириченко.

плотностей негатива. Специальное приспособление дает возможность считывать координаты и значения оптической плотности в любой точке изображения. Другой телевизионный экран установки показывает кривую распределения оптической плотности негатива по осям координат. Переход от плотностей к яркостям не представляет труда.

С осени 1978 г. на этом комплексе работают юные любители астрономии, члены кружка при Клубе юных техников СО АН СССР, под руководством В. И. Кириченко. Они уже построили с его помощью эквиденситограммы Луны, кометы Уэста, большой туманности Ориона, а также серебристых облаков (рис. 55) по снимкам, полученным ими же.

Кружки любителей астрономии, состоящие в контакте со специальными астрономическими учреждениями, научными институтами, вузами, имеющими такие приборы, могут последовать примеру новосибирцев и использовать эти приборы для исследований серебристых облаков, а также и других небесных объектов.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Мы описали основные виды наблюдений серебристых облаков, а также методы обработки этих наблюдений. Прочитав книгу и познакомившись с этими методами, читатель, который заинтересуется серебристыми облаками и захочет их наблюдать, должен поступить следующим образом.

Если он еще ни разу не видел серебристые облака, надо с ними сперва познакомиться. Для этого нужно, дождавшись начала лета, приступить к систематическому обзору северной части неба и вести наблюдения по программе, изложенной в § 11. Имея фотоаппарат, нужно потренироваться в фотографировании серебристых облаков. Таким образом, первое лето следует использовать для подготовки и тренировки. При этом нужно помнить, что серебристые облака могут в данное лето и не появиться вовсе. Тогда этот этап работы переносится на следующее лето.

Осенью и зимой надо привести в порядок записи наблюдений, сообщить о них в отдел серебристых облаков ВАГО и подготовиться к следующему лету; изготовить необходимые приспособления: палетку для измерения координат на фотографиях, установку для панорамной съемки серебристых облаков (она же будет служить для колориметрии и поляриметрии), калибровочный фонарь или миру, трубчатый фотометр, стандартизационную насадку (или три на-

садки в случае поляриметрических наблюдений), устройство для одновременного производства экспозиций, подготовить столбы-ориентиры.

Начиная со второго лета, можно вести наблюдения по полной программе. Однако еще раз напоминаем, что не нужно себя перегружать, работу надо брать по силам, но непременно доводить до конца. Если наблюдения ведет кружок, распределение обязанностей между членами кружка должно быть четким и ясным, каждый отвечает за порученную ему часть работы, а руководитель — за всю работу.

Если предполагается определять высоты серебристых облаков, расстояние между пунктами наблюдений — базис — нужно измерить геодезическими методами. Лучше всего привлечь для этого геодезистов из ближайшего отделения ВАГО. Их же надо попросить определить координаты (высоты и азимуты) наземных ориентиров (см. § 14). Достаточно одного опытного геодезиста с теодолитом и мерной лентой, чтобы под его руководством кружок мог своими силами провести все геодезические работы.

Как уже говорилось, по окончании сезона наблюдений нужно, не дожидаясь завершения их обработки, сообщить даты и время наблюдавшихся появлений серебристых облаков по адресу:

103001, Москва, К-1, Садовая-Кудринская, д. 24, Центральный совет ВАГО, отдел серебристых облаков.

По этому же адресу можно обращаться для получения советов, консультаций и указаний.

Нам остается пожелать читателям успешных наблюдений и интересных исследований того редкого и красивого явления природы, каким являются серебристые облака.

ПРИЛОЖЕНИЯ

1. Строение земной атмосферы
(стандартная атмосфера США 1962 г. для широты 45°)

Высота, км	Давление, мбар	Плотность, г/см³	Температура, К
0	1013	$1,225 \cdot 10^{-3}$	288
10	264	$4,13 \cdot 10^{-4}$	223
20	54,75	$8,80 \cdot 10^{-5}$	217
30	11,72	$1,80 \cdot 10^{-5}$	227
40	2,87	$4,00 \cdot 10^{-6}$	250
50	$7,87 \cdot 10^{-1}$	$1,03 \cdot 10^{-6}$	271
60	$2,25 \cdot 10^{-1}$	$3,06 \cdot 10^{-7}$	256
70	$5,45 \cdot 10^{-2}$	$6,75 \cdot 10^{-8}$	220
80	$1,04 \cdot 10^{-2}$	$2,00 \cdot 10^{-8}$	181
90	$1,64 \cdot 10^{-3}$	$3,17 \cdot 10^{-9}$	181
100	$3,01 \cdot 10^{-4}$	$4,97 \cdot 10^{-10}$	210
110	$7,26 \cdot 10^{-5}$	$9,83 \cdot 10^{-11}$	257
120	$2,49 \cdot 10^{-5}$	$2,44 \cdot 10^{-11}$	351
150	$5,06 \cdot 10^{-6}$	$1,84 \cdot 10^{-12}$	893
200	$1,33 \cdot 10^{-6}$	$3,32 \cdot 10^{-13}$	1236
400	$4,03 \cdot 10^{-8}$	$6,50 \cdot 10^{-15}$	1487
600	$3,45 \cdot 10^{-9}$	$4,64 \cdot 10^{-16}$	1506
700	$1,92 \cdot 10^{-9}$	$1,54 \cdot 10^{-16}$	1508

2. Календарь сроков начала и конца наблюдений серебристых облаков

В таблице для широт 45—60° через 12-дневные интервалы даны моменты начала и конца видимости серебристых облаков, соответствующие углам погружения Солнца под горизонт 6 и 18°. Приводимые даты соответствуют дате вечера данной ночи. Для перевода табличных моментов $T_м$ местного времени в декретное летнее время служит формула

$$T_{дл} = T_м + 4 \text{ часа} + \Delta T - \lambda,$$

где $T_{дл}$ — декретное летнее время в пункте наблюдений, ΔT — разность между этим и московским временем в часах, λ — долгота места. Для марта и октября, когда действует зимнее время, в формуле должно стоять 3 часа, а не 4 часа.

Дата	Период видимости серебристых облаков в часах	
	Широта 45°	Широта 50°
Март 2	18,3—19,4; 5,0—6,1	18,3—19,5; 4,9—6,1
14	18,6—19,7; 4,6—5,7	18,6—19,8; 4,5—5,7
26	18,8—20,0; 4,2—5,4	18,9—20,2; 4,0—5,2
Апрель 7	19,1—20,3; 3,8—5,0	19,2—20,6; 3,5—4,8
19	19,3—20,7; 3,3—4,6	19,6—21,1; 2,9—4,4
Май 1	19,6—21,0; 2,8—4,2	19,9—21,6; 2,3—4,0
13	19,9—21,4; 2,4—4,0	20,2—22,2; 1,6—3,6
25	20,1—21,8; 2,1—3,8	20,5—23,1; 0,8—3,3
Июнь 6	20,3—22,2; 1,8—3,6	20,8—3,2
18	20,4—22,4; 1,7—3,6	20,9—3,1
30	20,4—22,4; 1,8—3,7	21,0—3,2
Июль 12	20,4—22,2; 2,0—3,8	20,8—3,4
24	20,2—21,8; 2,4—4,0	20,6—22,8; 1,4—3,6
Август 5	19,9—21,4; 2,8—4,3	20,2—22,1; 2,1—4,0
17	19,6—21,0; 3,2—4,6	19,9—21,5; 2,6—4,3
29	19,2—20,5; 3,5—4,8	19,4—20,9; 3,2—4,6
Сентябрь 10	18,9—20,1; 3,8—5,1	19,0—20,4; 3,6—5,0
22	18,5—19,6; 4,1—5,3	18,6—19,8; 3,9—5,2
Октябрь 4	18,1—19,2; 4,4—5,6	18,1—19,3; 4,3—5,6
16	17,8—18,8; 4,6—5,8	17,7—18,9; 4,6—5,9
28	17,3—18,6; 4,9—6,2	17,2—18,6; 4,9—6,3

	Широта 55°	Широта 60°
Март 2	18,2—19,6; 4,8—6,2	18,2—19,8; 4,6—6,2
14	18,6—20,0; 4,2—5,7	18,6—20,4; 4,0—5,6
26	19,0—20,5; 3,7—5,2	19,2—21,0; 3,2—5,0
Апрель 7	19,4—21,1; 3,0—4,6	19,7—21,8; 2,3—4,3
19	19,8—21,8; 2,4—4,1	20,2—23,2; 0,8—3,7
Май 1	20,3—22,7; 1,2—3,6	20,8—3,1
13	20,7—3,1	21,4—2,4
25	21,1—2,7	22,1—1,8
Июнь 6	21,5—2,5	22,7—1,2
18	21,7—2,4	23,2—0,8
30	21,7—2,5	23,1—1,0
Июль 12	21,5—2,7	22,6—1,6
24	21,1—3,1	22,0—2,3
Август 5	20,7—3,5	21,4—2,9
17	20,2—22,4; 1,8—4,0	20,7—3,5
29	19,7—21,5; 2,6—4,4	20,0—22,4; 1,6—4,1
Сентябрь 10	19,2—20,7; 3,2—4,8	19,4—21,3; 2,6—4,6
22	18,6—20,1; 3,7—5,2	18,7—20,5; 3,3—5,1
Октябрь 4	18,1—19,5; 4,1—5,6	18,1—19,8; 3,8—5,5
16	17,6—19,0; 4,5—5,9	17,6—19,2; 4,4—6,0
28	17,2—18,6; 4,9—6,3	17,0—18,6; 4,8—6,5

3. Расстояние до проекции серебристых облаков на земную поверхность

z	S, км	z	S, км	z	S, км	z	S, км
45°	82	72°	241	82°00′	478	86°00′	700
46	84	73	254	10	482	10	711
47	87	74	270	20	489	20	727
48	90	75	286	30	497	30	739
49	93	76	304	40	504	40	755
50	96	77	324	50	512	50	768
51	100	78	346	83°00′	520	87°00′	782
52	104	79°00′	374	10	529	10	798
53	108	10	378	20	537	20	811
54	111	20	384	30	545	30	827
55	115	30	389	40	553	40	844
56	120	40	393	50	562	50	860
57	125	50	398	84°00′	570	88°00′	876
58	130	80°00′	404	10	581	10	892
59	135	10	409	20	590	20	910
60	140	20	414	30	600	30	926
61	145	30	419	40	609	40	946
62	151	40	425	50	620	50	964
63	157	50	429	85°00′	631	89°00′	981
64	165	81°00′	436	10	644	10	1001
65	172	10	444	20	655	20	1021
66	179	20	449	30	666	30	1041
67	188	30	456	40	676	40	1062
68	196	40	461	50	687	50	1082
69	207	50	469				
70	216						
71	228						

4. Разности географической (φ) и геоцентрической (φ′) широт, радиус R Земли и радиус кривизны дуги меридиана ($R_к$)

φ	φ—φ′	R, км	$R_к$, км
45°	11′,5	6367	6367
50	11,4	6365	6373
55	10,9	6364	6379
60	10,0	6362	6383
65	8,9	6360	6388
70	7,4	6359	6392

5. Относительная оптическая толщина воздуха для различных зенитных расстояний

z	$M(z)$	z	$M(z)$	z	$M(z)$	z	$M(z)$
0°	1,000	50°	1,553	68°	2,654	80°	5,60
10	1,015	55	1,742	70	2,904	82	6,88
20	1,064	60	1,995	72	3,209	84	8,90
30	1,154	62	2,123	74	3,588	85	10,40
40	1,304	64	2,274	76	4,075	86	12,44
45	1,413	66	2,447	78	4,716	87	15,36

6. Угол двойной рефракции ϑ и горизонтальная воздушная масса M_{90} в функции минимальной высоты луча H_0

H_0, км	ϑ	M_{90}	H_0, км	ϑ	M_{90}
2	55′,72	30,32	12	19,66	7,80
3	49,96	25,88	14	14,27	5,72
4	45,08	23,75	16	10,37	4,20
5	40,52	20,94	18	7,59	3,04
6	36,56	18,51	20	5,58	2,22
7	33,38	16,26	25	2,56	1,02
8	30,42	14,22	30	1,16	0,47
9	27,79	12,42	35	0,53	0,22
10	25,19	10,70	40	0,24	0,10

ОГЛАВЛЕНИЕ

Предисловие 3

ГЛАВА I

ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ О СЕРЕБРИСТЫХ ОБЛАКАХ

§ 1. Открытие и первые исследования 5
§ 2. Строение верхних слоев атмосферы 11
§ 3. Условия наблюдений, высоты и скорости серебристых облаков 19
§ 4. Морфология и структура серебристых облаков 26
§ 5. Оптические свойства серебристых облаков 34
§ 6. Наблюдения серебристых облаков из космоса 43
§ 7. Природа серебристых облаков 49
§ 8. Ядра конденсации: теория и эксперименты 58
§ 9. Серебристые облака на других планетах 63

ГЛАВА II

НАБЛЮДЕНИЯ СЕРЕБРИСТЫХ ОБЛАКОВ

§ 10. Задачи наблюдений серебристых облаков 68
§ 11. Синоптические наблюдения 71
§ 12. Фотографирование серебристых облаков 75
§ 13. Киносъемка серебристых облаков 82
§ 14. Развертка полей серебристых облаков на земную поверхность и определение их движений 85
§ 15. Определение высот серебристых облаков 94
§ 16. Фотометрия, колориметрия и поляриметрия серебристых облаков 96
§ 17. Применение метода эквиденсит 113

Заключение 122
Приложения 124

5
1

9
6
4
3
19
58
63

68
71
75
82

85
94

96
113

122
124

20 к.

